

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Шабардин Дмитрий Павлович

**УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ В СОСТАВЕ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ИХ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ
СРЕДУ С ВЫРАБОТКОЙ ЭНЕРГИИ**

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Стрижак Павел Александрович

Томск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ	19
1.1. Технологии и способы утилизации коммунальных отходов	19
1.2. Технологии и способы утилизации отходов сырьевого сектора	21
1.3. Утилизация отходов в топочных камерах энергетических установок и на мусоросжигательных заводах	22
1.4. Сложности утилизации коммунальных отходов	25
Выводы по первой главе.....	28
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ СТЕНДЫ	30
2.1. Планирование экспериментальных исследований	30
2.2. Характеристики и свойства компонентов КЖТ.....	31
2.3. Метод приготовления КЖТ	33
2.4. Используемые экспериментальные стенды.....	34
Выводы по второй главе.....	39
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ С ТКО	41
3.1. Основные характеристики процессов зажигания и последующего горения	41
3.2. Анализ влияния компонентного состава органоводоугольного топлива на характеристики зажигания	42
3.3. Условия зажигания органоводоугольного топлива на основе углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин	51
3.4. Анализ влияния типичных твердых коммунальных отходов в составе	

композиционного топлива на время задержки зажигания	55
3.5. Анализ влияния механизма подвода тепла на характеристики зажигания и горения композиционного топлива с добавлением твердых коммунальных отходов	59
3.6. Анализ влияния отработанного масла в составе композиционного топлива на характеристики зажигания	65
3.7. Установленные режимы зажигания композиционных топлив	71
3.8. Анализ совместного влияния группы факторов на времена задержки зажигания и длительности горения композиционного топлива	74
3.9. Анализ совместного влияния группы факторов на длительность и скорости выгорания композиционного топлива	79
3.10. Анализ влияния ТКО и отработанного масла в составе композиционного топлива на концентрации антропогенных выбросов при сжигании топливных композиций	87
3.11. Относительные показатели эффективности КЖТ	89
Выводы по третьей главе.....	93
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ ИЗ ОТХОДОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА	96
4.1. Описание модели	96
4.2. Результаты моделирования	99
Выводы по четвертой главе	108
ГЛАВА 5. СОВМЕСТНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ КОММУНАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ С ВЫРАБОТКОЙ ЭНЕРГИИ	109
5.1. Перспективы совместной утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой энергии в Сибири	109
5.1.1. Описание объектов сравнительного анализа	110

5.1.2. Энергетический потенциал промышленных отходов и ТКО	114
5.1.3. Энергетический потенциал отходов обогащения угля и нефтепереработки	117
5.1.4. Потребность в энергоресурсах угольных котельных установок большой и малой энергетики	120
5.1.5. Стратегия совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии	123
5.2. Перспективы утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии в мире	127
Выводы по пятой главе	133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ	140
ЛИТЕРАТУРА	144
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты об использовании результатов исследований	160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме исследований	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Список докладов по теме исследований	165

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие мировой экономики вызывает увеличение объемов потребления энергоресурсов (рисунок 1) [1]. Несмотря на развитие альтернативных источников энергии и увеличение их доли в общемировой структуре энергетического баланса более чем в 10 раз за последние 50 лет, в настоящее время относительное значение этой характеристики составляет около 9% (рисунок 2). Это почти в 7 раз меньше по сравнению с выработкой энергии ТЭС при сжигании углеводородов и почти в 3 раза меньше по сравнению с выработкой энергии АЭС и ГЭС. Увеличению доли нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НИЭ) на практике препятствуют существенные недостатки [2, 3]:

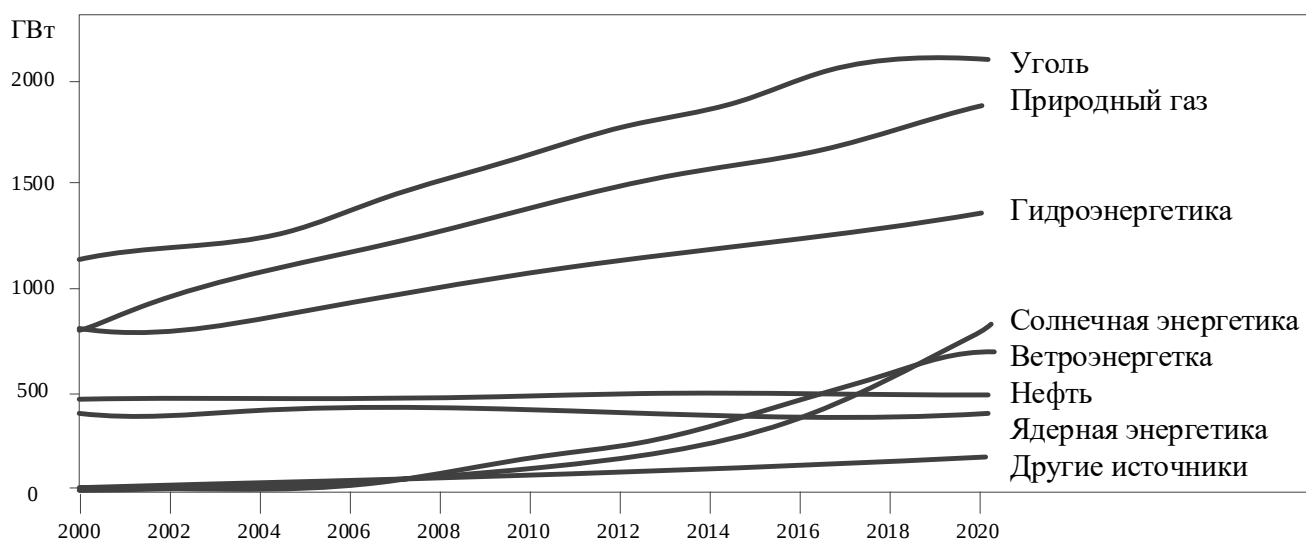


Рисунок 1. Мощность энергогенерации по источникам [1]

- энергоустановки имеют низкий КПД по преобразованию первичной энергии в теплоту (фотопреобразователи – 12–16%, НИЭ – 30–40%, ГЭС – 60–70%);
- большая суточная и сезонная нестабильность мощности основных НИЭ требует создания сложных технических систем, которые объединяют энергоустановки на разных НИЭ, а также стенды, аккумулирующие и генерирующие энергию путем сжигания углеводородного топлива.

Все эти недостатки существенно усложняют и удорожают процесс производства энергии, снижают надежность системы энергоснабжения.

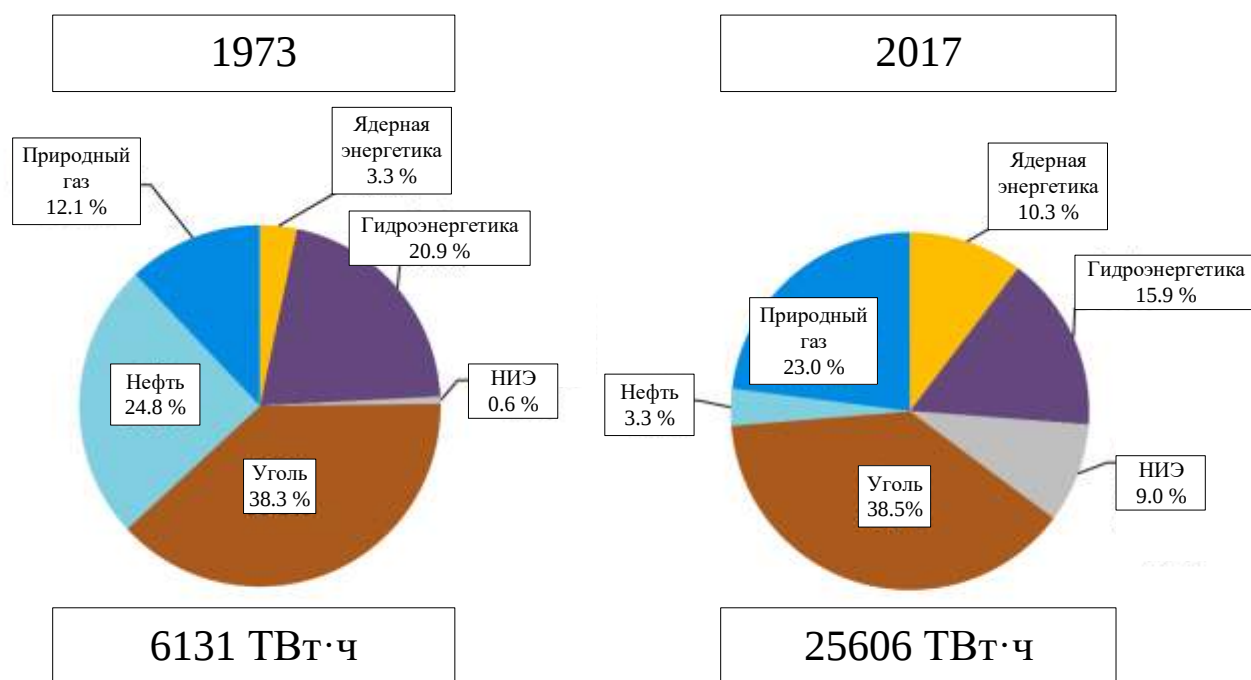


Рисунок 2. Общемировая структура энергогенерации [1]

Страны с большим запасом традиционных энергоресурсов ввели на практике программы освоения НИЭ [4]. Эти программы, с одной стороны, заключаются в поощрении развития НИЭ и расширении их номенклатуры, с другой стороны, накладывают ограничения на сжигание углеводородов для производства энергии. По прогнозам Международного энергетического агентства [7], доля НИЭ в мировом балансе производства электроэнергии к 2050 году будет составлять 46%. Существенный прирост мощностей обусловлен комплексным применением НИЭ. Реализованы проекты по строительству солнечных, ветряных, приливных, геотермальных и гидроэлектростанций. Вместе с этим возрастает интерес к коммунальным и промышленным отходам, которые имеют большой потенциал для производства энергии при их утилизации [5, 6]. Таким образом в Европе постепенно нарастает тенденция к отказу от угля как источника энергии.

Во многих странах мира, таких как Китай, Индия, Индонезия, где расположены месторождения твердых полезных ископаемых, в последние десятилетия возрастает добыча (таблица 1) и экспорт высококачественных марок угля и собственное потребление местных низкокачественных марок угля. Это объясняется дешевизной угля относительно других углеводородов. Увеличение объемов потребления угля в рамках традиционных технологий сжигания, к сожалению, приведет к

достаточно существенному ухудшению экологической обстановки в мире. При функционировании угольных тепловых электростанций и котельных в окружающую среду в составе дымовых газов поступают газы CO, CO₂, SO₂, NO_x, летучая зола, которые оказывают негативное влияние на атмосферу [10]. Также в ходе обогащения угля образуются фильтр-кеки – высокозолые отходы, которые занимают значительные площади и наносят вред окружающей среде. Всего при добыче и обогащении угля за 2017 год в России было образовано 3236,6 млн тонн отходов. Из них 1526,9 млн тонн (47 %) было размещено на отвалах на территориях различных предприятий [9].

Таблица 1. Мировая добыча угля (за 2018 г.) [1]

Производство угля	млн тонн	%
Китай	3550	45.4
Индия	771	9.9
США	685	8.8
Индонезия	549	7.0
Австралия	483	6.2
Россия	420	5.4
ЮАР	259	3.3
Германия	169	2.2
Польша	122	1.6
Казахстан	114	1.5
Другие государства	691	8.7
Всего	7813	100.0

Вместе с тем в последнее время актуальной задачей является утилизация твердых коммунальных отходов (ТКО, [160]). Несмотря на распространение технологий по переработке и повторному использованию, повсеместное внедрение данных технологий осуществится еще нескоро [8, 10]. Но уже сейчас необходимо решать, что делать с не только постоянно образующимися отходами, но и огромным коли-

чеством уже накопленных отходов, хранящихся на полигонах по всему миру. Существуют способы использования твердых коммунальных отходов в качестве топлива для сжигания на мусоросжигательных заводах. Существуют две группы известных технологий мусоросжигания по температурному режиму [11]: низкотемпературные (600–900 °С) и высокотемпературные (более 900 °С). Низкотемпературный режим сжигания не требует применения дорогостоящего технологического оборудования и дополнительных высококачественных топлив (например, природного газа) для поддержания рабочей температуры в топке, но при прямом низкотемпературном сжигании твердых коммунальных отходов выделяется достаточно большое количество токсичных веществ (диоксинов, полиароматических углеводородов, фуранов). Для соответствия состава дымовых газов нормам по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу необходимо применение дорогостоящих систем газоочистки. В связи с этим большинство мусоросжигательных заводов являются убыточными и экологически неэффективными [73].

Более экологически безопасными являются высокотемпературные технологии сжигания твердых коммунальных отходов, т.к. при температурах процесса выше 1300 °С происходит полное разложение наиболее вредных веществ (диоксинов и фуранов) до простейших составляющих [134]. Поэтому отсутствует необходимость применения дорогостоящих систем очистки дымовых газов. Но для поддержания относительно высокой температуры в топке необходимо использовать специализированное термическое или электроплазменное оборудование. Как правило, для обеспечения функционирования такого оборудования расходуется высококачественное топливо или затрачивается энергия в бóльшем количестве, чем она выделяется при сжигании твердых коммунальных отходов [12, 13]. Несмотря на очевидное преимущество по экологическим показателям электроплазменных технологий утилизации твердых коммунальных отходов при температурах в объеме реактора более 1300 °С они не получили широкого применения на практике и используются преимущественно для утилизации опасных медицинских отходов [135].

Таким образом, актуален поиск способов эффективной утилизации отходов

углепереработки и твердых коммунальных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии при минимальных экономических затратах.

Альтернативным вариантом решения этих проблем является применение твердых коммунальных отходов для сжигания их в составе композиционных жидких топлив. Композиционные жидкие топлива (КЖТ), в частности водоугольные (ВУТ) или органоводоугольные (ОВУТ), представляют собой вязкие, достаточно стабильные, экологически чистые суспензии (относительно угольных технологий сжигания), в которых используются уголь, либо отходы углеобогащения в качестве горючей основы [14–17]. Процессы сжигания композиционного топлива характеризуются повышенными экологическими и экономическими показателями по сравнению с процессом сжигания твердого натурального топлива [18, 19].

Сначала композиционные жидкие топлива задумывались как альтернатива мазуту для зажигания на соответствующих котлах, однако в дальнейшем область применимости данных топлив существенно расширилась [15]. Известные мировые исследовательские центры и крупные научные лаборатории Китая, Индии, Японии активно занимаются вопросами создания и внедрения композиционных жидких топлив. На данный момент действуют различные демонстрационные, опытно-промышленные и коммерческие установки по производству и использованию композиционных жидких топлив [15, 17]. В России работы, направленные на внедрение ВУТ, существенно замедлились из-за достаточно больших запасов нефти, газа и угля, а также увеличения объемов их поступления на рынки энергоресурсов по доступным ценам [15]. Первым и наиболее известным опытом промышленного использования ВУТ в России является внедрение комплекса по приготовлению, транспортировке (по трубопроводу «Белово–Новосибирск» протяженностью 262 км) и сжиганию ВУТ на Новосибирской ТЭЦ-5 (в котлах паропроизводительностью 670 т/ч) [15]. За период с 1989 г. по 1997 г. по трубопроводу доставлено на Новосибирскую ТЭЦ-5 более 350 тыс. м³ ВУТ. В 1997 г. в период профилактики Новосибирской ТЭЦ-5 трубопровод остановлен [15]. В качестве основных причин приостановления работы трубопровода выделены [16]: политические (не учтены интересы всех участников процесса выработки энергии), экономические (кризис,

спад), технологические (сложности впрыска, непостоянное давление, промерзание участков трубопровода).

За последнее время в Китае, России, Индии и Японии интерес к композиционным топливам на основе отходов углеобогащения (фильтр-кеков) существенно возрос. Постоянно проводятся исследования [15, 139-144], направленные на изучение основных характеристик сжигания таких топлив в модельных камерах сгорания с целью получения оптимальных составов и улучшения горения КЖТ. В России данным вопросом занимались известные специалисты: Алексеев С.В., Баранова М.П., Богомоллов А.Р., Бурдуков А.П., Валиуллин Т.Р., Ведрученко В.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Горлов Е.Г., Делягин Г.Н., Дектерев А.А., Дзюба Д.А., Заостровский А.Н., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Кузнецов Г.В., Кулагин В.А., Мальцев Л.И., Мурко В.И., Овчинников Ю.В., Осинцев В.В., Патраков Ю.Ф., Попов В.И., Пузырев Е.М., Рыжков А.Ф., Саломатов В.В., Стрижак П.А., Шевырев С.А., Цепенков А.И., Федорова Н.И., Федяев В.И., Ходаков Г.С., Чернецкий М.Ю. Известно [21], что фильтр-кеки имеют малое количество летучих компонентов и углерода по сравнению с углями. Как следствие, времена задержки зажигания таких топлив существенно выше [20]. Поэтому проводятся исследования с целью улучшения свойств горения композиционных жидких топлив. На основании оценок [22] можно предположить, что введение типичных твердых коммунальных отходов в состав композиционных топлив в количестве 10–20% позволит снизить на 20–30% площадь территорий вновь организуемых полигонов для захоронения твердых коммунальных отходов и обеспечить экономию исчерпаемых углеводородных топлив, которые сжигаются для производства электрической энергии и теплоты.

Исследования экологических характеристик сжигания водоугольных топлив с добавками твердых коммунальных отходов ранее не осуществлялись. Не сформирована информационная база основных экологических характеристик сжигания органоводоугольных топлив с добавками твердых коммунальных отходов. Не установлено влияние основных компонентов твердых коммунальных отходов на характеристики горения. Это ограничивает обоснование целесообразности добавления

твердых коммунальных отходов к ВУТ и ОВУТ для минимизации негативного влияния жидких и коммунальных отходов на окружающую среду.

Использование КЖТ с твердыми коммунальными отходами позволит утилизировать накопленные фильтр-кеки и твердые коммунальные отходы, снизить выбросы оксидов азота и серы в атмосферу. Добавление в состав композиционных топлив типичных твердых коммунальных отходов (в пределах 10%) будет способствовать совместному решению проблем восполнения дефицита энергоресурсов и утилизации отходов [25, 141-142].

Целью диссертационной работы является обоснование возможности использования твердых коммунальных отходов в качестве перспективных компонентов суспензионных топлив на основе отходов углеобогащения для сжигания в топках котельных агрегатов путем экспериментальных исследований характеристик процессов их горения, а также при анализе перспектив совместной утилизации промышленных и твердых коммунальных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния исследований и технических решений в области утилизации твердых коммунальных отходов в России и мире. Выявление факторов, препятствующих эффективной утилизации твердых коммунальных отходов. Разработка способа решения проблемы на основе экологически, экономически и энергетически выгодного сжигания суспензий с твердыми коммунальными отходами.
2. Разработка экспериментальной методики с целью использования нескольких стендов и специализированных модельных камер сгорания для изучения процессов зажигания и горения капель КЖТ с варьируемой температурой, а также доминирующим механизмом нагрева.
3. Приготовление составов КЖТ из отходов угле- и нефтепереработки с добавлением твердых коммунальных отходов. Анализ сырьевой базы для развития технологий сжигания КЖТ с твердыми коммунальными отходами при учете

энергетических, экологических и экономических факторов, типичных для котельных установок большой и малой энергетики.

4. Определение параметров работы стендов, соответствующих условиям устойчивого зажигания капель перспективных для топок водогрейных и паровых котлов суспензий КЖТ.
5. Экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса при горении капель КЖТ с твердыми коммунальными отходами.
6. Определение влияния температуры нагретого газа, размеров частиц, концентрации компонентов суспензий КЖТ на времена задержки и пороговые температуры зажигания КЖТ.
7. Выделение перспективных добавок из числа промышленных и коммунальных отходов в КЖТ для варьирования в широких диапазонах интегральных характеристик их зажигания и горения.
8. Изучение характеристик горения композиционного топлива с варьируемым составом в разных условиях нагрева для обоснования возможности протекания процесса горения в условиях, характерных для топок котлоагрегатов.
9. Анализ структуры, объемов и энергетического потенциала для наиболее широко распространенных твердых коммунальных отходов, низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки.
10. Разработка концепции вовлечения перспективных композиционных топлив из низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки, твердых коммунальных отходов в топливно-энергетический комплекс с обоснованием положительных экологических, экономических и социальных эффектов.

Научная новизна работы. Предложен способ утилизации твердых коммунальных отходов в составе КЖТ при сжигании в топочных камерах котельных установок большой и малой энергетики. Установлены условия и характеристики эффективного зажигания суспензий КЖТ с добавлением твердых коммунальных отходов в модельных камерах сгорания. Получены аппроксимационные выражения для прогнозирования значений этих характеристик, а также развития моделей

зажигания и горения мультитопливных капель КЖТ. Проанализирована структура, объемы и энергетический потенциал широко распространенных твердых коммунальных отходов, низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки. Продемонстрированы высокие значения относительных комплексных экологических, экономических и энергетических индикаторов сжигания КЖТ с твердыми коммунальными отходами в сравнении с традиционным пылевидным сжиганием угля. Диссертационная работа соответствует области теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Полученные результаты выполненной работы способствуют развитию технологий, позволяющих экономить энергетические ресурсы.

Практическая значимость. С использованием полученных в настоящей работе экспериментальных и теоретических значений характеристик процессов зажигания (предельные температуры, минимальные времена прогрева, требуемые расходы) и горения (максимальные температуры, времена выгорания капель топливного аэрозоля, скорости горения, антропогенные выбросы) КЖТ с добавлением твердых коммунальных отходов появляется возможность спрогнозировать возможность их эффективного применения на водогрейных и паровых котлах энергетических установок различной производительности. Результаты диссертационных исследований используются при выполнении инвестиционного проекта, направленного на создание первого в России опытно-промышленного участка подготовки и сжигания органоводоугольного топлива с применением промышленных и коммунальных отходов в г. Томске. Получены акты об использовании результатов диссертационных исследований на энергетических предприятиях Кемеровской и Томской области при реализации проекта по замене угля на КЖТ с твердыми коммунальными отходами, а также в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке специалистов (магистратура, аспирантура) в области экологически чистых топливных технологий.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования зажигания капель КЖТ и изучение влияния добавления твердых коммунальных отходов в КЖТ на характеристики процессов их прогрева и зажигания выполнены при поддержке грантов: РНФ № 15-19-10003 «Разработка основных элементов теории зажигания существенно неоднородных по структуре капель органоводоугольных топлив» (2015–2017 гг.) и Президента РФ № МК-2391.2014.8 «Исследование процессов сопряженного тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых превращений и химического реагирования при нагревании твердых и гелеобразных конденсированных веществ локальными источниками ограниченной энергоемкости» (2015–2016 гг.). Разработка концепции вовлечения композиционных топлив из низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки, твердых коммунальных отходов в топливно-энергетический комплекс с обоснованием положительных экологических, экономических и социальных эффектов выполнена в рамках гранта РФФИ «р_а» № 18-43-700001 «Разработка теоретических основ ресурсоэффективных теплоэнергетических технологий сжигания промышленных и коммунальных отходов в составе композиционных топлив» (2018–2020 гг.).

Достоверность результатов диссертационных исследований подтверждается использованием современных высокоточных оптических методов, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, выполненным анализом систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной корреляцией некоторых полученных данных с известными результатами исследований других исследователей.

Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии энергоэффективного

производства и преобразования энергии на органическом топливе»).

Личный вклад автора включает в себя формирование целей работы, выводов и защищаемых положений, задач диссертации, разработке методик исследований, планировании экспериментальных исследований, проведении опытов, оценке случайных и систематических погрешностей, обработке результатов опытов, варьировании параметров на математической модели топочной камеры в случае недоступности проведения экспериментов в лаборатории, обобщении и анализе экспериментальных результатов исследований, разработке рекомендаций использования полученных результатов, апробации результатов.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. При использовании твердых коммунальных отходов в составе суспензионных топлив возможно существенное сбережение энергетических ресурсов при сохранении высоких энергетических характеристик котельных агрегатов. Теплота сгорания суспензий с твердыми коммунальными отходами может достигать 11-15 МДж/кг. Максимальное отличие времен задержки зажигания КЖТ с добавлением и без твердых коммунальных отходов составляет не более 22% в области относительно невысоких температур (до 900 °С). При температурах, поддерживаемых в топках котельных агрегатов (более 900 °С), отличия времен задержки зажигания для разных составов топлива не превышают 10%.
2. За счет совместного сжигания твердых коммунальных отходов, а также отходов углеобогащения и нефтепереработки в составе суспензий возможно уменьшение вредного воздействия на окружающую среду котельных установок. Концентрации основных газовых антропогенных выбросов (NO_x и SO_x) в неочищенных газообразных продуктах сгорания КЖТ из отходов углеобогащения с добавлением твердых коммунальных отходов ниже на 15–60 % по сравнению со сжиганием КЖТ без добавления твердых коммунальных отходов.
3. Скорости горения КЖТ, приготовленных на основе отходов углеобогащения (фильтр-кеков), близки (отличия менее 10%) к скоростям горения суспензий, приготовленных из углей. Экономические и экологические индикаторы кеков в несколько раз выше, чем у углей. Поэтому целесообразно применение фильтр-кеков,

как основного горючего компонента КЖТ при утилизации твердых коммунальных отходов.

4. Относительные показатели (с учетом экологических, энергетических и экономических индикаторов) суспензионных топлив с добавлением твердых коммунальных отходов выше в 1.5–3 раза по сравнению с шламами и кеками без твердых коммунальных отходов, и более чем в 10 раз выше, чем у угля. Полученные результаты могут быть использованы при разработке теоретических основ создания малоотходных тепловых установок и технологических систем в целом.

5. При замене угля эквивалентным по калорийности количеством композиционного топлива с твердыми коммунальными отходами для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов на примере трех регионов Российской Федерации экономия твердого натурального топлива будет составлять не менее 10 млн тонн ежегодно на протяжении 25 лет.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015, 2017), на Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2015), , Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017 г.), Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018), Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2018, 2019), Международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019), XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2019), XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2019), Семинаре ВУЗов по теплофизике и энергетике (Санкт-Петербург, 2019).

Публикации. Основные положения, результаты и выводы диссертационных исследований опубликованы в виде 8 статей, в том числе 2 – в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Бутлеровские сообщения», «Химическое и нефтегазовое машиностроение» («Chemical and Petroleum Engineering»), 6 – в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Fuel Processing Technology» (ИФ=4.5), «Journal of Cleaner Production» (ИФ=6.39), «Energies» (ИФ=2.67), «Powder Technology» (ИФ=3.41), «Journal of Environmental Management» (ИФ=4.17), «Chemosphere» (ИФ=4.1).

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований, содержит 48 рисунков, 21 таблицу, 166 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние научных исследований и технических решений в области утилизации твердых коммунальных отходов (в том числе с выработкой теплоты и электрической энергии), основные способы и используемое оборудование, выявлены достоинства и недостатки, представлен способ утилизации твердых коммунальных отходов в составе композиционных топливных суспензий.

Во второй главе приведено описание методик проведения исследований, стендов с группой модельных камер сгорания (для приближения условий инициирования горения к топкам водогрейных и паровых котлов), рассмотрены свойства и характеристики используемых компонентов для создания КЖТ.

В третьей главе приведены результаты исследования основных закономерностей и характеристик инициирования горения капель композиционного жидкого топлива в потоке разогретого воздуха в модельной камере сгорания. Определены необходимые и достаточные условия для реализации зажигания капель

КЖТ, приготовленных на основе отходов угле– и нефтепереработки с добавлением твердых коммунальных отходов. Изучены процессы газофазного и гетерогенного зажигания КЖТ в контролируемых условиях. Разработаны рекомендации по использованию результатов исследований, а также рекомендации по развитию сформулированного научного подхода для повышения эффективности сжигания суспензионных топлив (в том числе на основе отходов угле- и нефтепереработки с добавлением твердых коммунальных отходов) в топочных камерах котельных агрегатов.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования процессов горения исследуемых составов в котельной установке, а также приведены сравнения полученных результатов с экспериментами. Геометрия модели основана на реально существующем котле. На разработанной модели проведено варьирование некоторых параметров с целью нахождения оптимальных условий горения. Проведены расчеты по нахождению оптимального расхода воздуха, расхода топлива, а также оптимальной концентрации добавленного в композиционное топливо твердых коммунальных отходов. Созданную модель можно использовать для прогнозирования интегральных характеристик сжигания КЖТ с твердыми коммунальными отходами в котельных установках большой и малой энергетики.

В пятой главе приведены расчеты по совместной утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой энергии. Вычислено количество сэкономленного высококачественного твердого натурального топлива, при замене эквивалентным по калорийности количеством перспективного композиционного топлива. Вычислено количество фильтр-кеков, твердых коммунальных отходов и отработанных масел, которое возможно утилизировать при использовании совместной утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой энергии.

В заключении представлены главные выводы, сформулированные в ходе работы над диссертацией.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

1.1. Технологии и способы утилизации коммунальных отходов

Значимую мировую экологическую проблему представляет утилизация твердых коммунальных отходов. Ежегодный прирост таких отходов в мире составляет 1,3–1,6 млрд. тонн [26]. Под твердыми коммунальными отходами понимаются остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, иных изделий или продуктов, которые образуются в процессе использования человеком [160]. К сожалению, большая часть отходов не утилизируется. Как следствие, образуются отвалы с огромными площадями. В настоящее время в Великобритании – 565 официальных свалок [27], в Канаде – более 2 тысяч [28], в Австралии – почти 3 тысячи [29]. На Украине санкционированных свалок – 6 тысяч, а несанкционированных – 35 тысяч [30]. В России к началу 2020 года было накоплено более 38 млрд. тонн промышленных и коммунальных отходов [147]. Ежегодно в России образуется 35–40 млн тонн твердых коммунальных отходов, из которых: 95% вывозится на свалки; 4,5% сжигается; 0,5% перерабатывается другим способом [147]. Ежегодно площадь свалок в России увеличивается на 0,4 млн га, действуют более 1400 полигонов ТКО, более 30 тыс. свалок [31, 147]. Эти свалки будут оставаться в течение длительного времени, длительность разложения, например, пластика составляет около 500 лет [32]. Вместе с пищевыми отходами, бумагой, стеклом, полимерной и металлической тарой выбрасываются ртутьсодержащие люминесцентные лампы, остатки лаков и красок, различная бытовая химия и лекарства [33]. Эти опасные элементы под видом коммунальных отходов вывозятся на свалки, которые создаются в оврагах, выработанных карьерах, лесах и полях.

На полигонах ТКО образуются фильтрат и свалочный газ, которые являются основными источниками загрязнения окружающей среды [32–35]. Фильтрат образуется в результате накопления осадков в среде твердых коммунальных отходов. Она состоит из продуктов разложения, различных ядовитых органических соединений, тяжелых металлов, имеет неприятный запах. Фильтрат, проникающий в почву, делает невозможным ее последующее использование [34]. Свалочный газ

получается в результате брожения твердых коммунальных отходов на полигоне и состоит в основном из метана и углекислого газа, а также различных токсичных соединений источающий неприятный запах [136]. Скопление большого количества газа может привести к самовозгоранию, и, следовательно, выбросу в атмосферу токсичных веществ [35]. Брикетирование позволяет уменьшить объем мусора, уменьшить вероятность возгорания, уменьшить вред, наносимый окружающей среде, а также улучшает удобство вывоза и использования мусора [39].

На полигонах ТКО развивается благоприятная среда для жизни возбудителей различных болезней, а также различных паразитов, грызунов и птиц [36]. Как следствие, в поселениях вблизи полигонов проходят митинги и происходят беспорядки по причине плохой экологической ситуации [37,38].

В сельских местностях довольно распространено компостирование, так как там велик процент органических отходов. С помощью этого способа можно утилизировать до 30 % отходов потребления. Для преобразования органических отходов в компост не требуются специализированное оборудование или дорогие добавки [150]. Компостирование отходов является естественным процессом, происходящим благодаря организмам, находящимся в органических материалах и земле, которые, питаясь совместно или поглощая друг друга, осуществляют переработку отходов. Данный способ тоже подразумевает сортировку мусора. Далее происходит разложение органической части отходов потребления микроорганизмами. Полученный компост является органическим удобрением. Одновременно происходит выделение углекислого газа. Необходимо влажное место в тени, необходимо обеспечивать отведение влаги [40]. Способ довольно простой в осуществлении, малозатратный, позволяет вторично использовать отходы и увеличивает количество полезных микроорганизмов в почве. Однако малое количество пригодных отходов делает невозможным повсеместное применение компостирования, тем более на полигонах с твердыми коммунальными отходами, а в некоторых случаях способствует привлечению паразитов и распространению нежелательных растений.

Близкой к способу компостирования является засыпка отходов землей с целью получения биогаза и последующим использованием его в качестве топлива

[41]. Биогаз на 2/3 состоит из метана – его удельная теплота сгорания составляет около 7000 ккал на м³, что является довольно низким показателем, и, соответственно, имеет низкую применимость [41]. Наиболее эффективно использование биогазовых технологий для переработки отходов в сельской местности, на животноводческих и птицеводческих фермах, так как они постоянны по времени и легко собираются. Поэтому для массовой утилизации твердых коммунальных отходов с полигонов этот способ не применим. К тому же, данный способ совершенно не решает экологических проблем с антропогенными выбросами и проблем с увеличением площадей полигона [41].

1.2. Технологии и способы утилизации отходов сырьевого сектора

Отходы нефтепродуктов — это вещества, образованные в процессе производства различных горючих материалов, либо горюче-смазочные материалы, утратившие потребительские свойства [44]. Основные промышленные горючие отходы представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Промышленные отходы в РФ в 2015 году [42]

Наименование групп отходов	Образование отходов, тонн	Использовано отходов, тонн	Обезврежено отходов, тонн
Отходы нефтепродуктов	530613.88	253647.16	255959.23
Другие нефтесодержащие отходы	5715714.22	3204228.135	1344110.119
Золы, шлаки, отходы углеобогащения	23445469.06	4411881.30	113.29

В ходе использования масел они загрязняются пылью, частицами металлов, волокнами материалов, в них попадают капельки воды. Это изменяет качество изначальных масел, и они становятся непригодными для дальнейшего использования, требуют замены [124].

Отходы нефтепродуктов нередко повторно используют. На специализиро-

ванных установках производится восстановление их первоначальных свойств, а затем организуется повторное использование. Однако на большинстве предприятий подобные мероприятия не проводятся, и отработанные масла хранятся на складах, либо утилизируются [44].

Все виды отработанных масел представляют большую опасность для окружающей среды, поскольку они содержат химические компоненты, многие из которых отличаются высокой токсичностью. Масла, накопленные на предприятиях, хранятся в металлических или пластмассовых емкостях, установленных на металлические поддоны. Причинами загрязнения окружающей природной среды отработанными маслами являются многочисленные случаи проливов, утечек, несанкционированного или аварийного сброса. Такие загрязнения наносят большой ущерб народному хозяйству, природной среде, флоре и фауне. Кроме того, отработанные масла способны к самовоспламенению и самовозгоранию. Поэтому длительное хранение таких отходов небезопасно [43].

Утилизация нефтесодержащих отходов сопровождается отстаиванием и фильтрацией. Применяют термомеханическое разделение на фракции, а также переработку декантерами. Подобные процедуры приводят к образованию нефтезагрязненных сточных вод и вторичных отходов [151].

Полученную после сжигания углей золу используют в производстве строительных материалов, таких как цемент и бетон. На пригодность золы для строительных целей влияет присутствие в ней вредных компонентов, которые отрицательно влияют на здоровье человека, либо ухудшают строительные характеристики [43].

1.3. Утилизация отходов в топочных камерах энергетических установок и на мусоросжигательных заводах

При сжигании мусор сжигается без остатка и частично поглощает ядовитые вещества. Сжигание проводят в мусоросжигательных печах, либо реализуют технологический пиролиз и газификацию отходов. Температура протекающих процессов соответствует диапазону 850–2500 °C [152]. К сжиганию мусора прибегают прежде

всего в странах с выраженным дефицитом пустующих площадей, пригодных для устройства свалок, например, в Японии и Европе (Германия, Бельгия, Нидерланды, Швейцария, Швеция, Австрия, Дания).

При слоевом сжигании сжигаются все поступающие отходы, проводится минимальная предварительная подготовка. Это наиболее распространенный и изученный метод сжигания отходов [152]. Поэтому известно большое количество достоинств и недостатков данного вида сжигания. Достоинства заключаются в том, что метод достаточно простой и не требует сложной сортировки, а выделившееся тепло можно использовать для выработки электроэнергии и отопления. Недостаток состоит в том, что требуется разработка новых способов сжигания. Вследствие высокой токсичности необходимо устанавливать устройства для улавливания загрязняющих веществ, как твердых, так и газообразных. Стоимость улавливающих устройств достигает 50% капитальных затрат мусоросжигательного комплекса, и к тому же требуют постоянной замены [152]. Загрязнение почвы диоксинами после слоевого сжигания делает прилегающие территории непригодными для жизни людей. Это является причиной массового закрытия мусоросжигательных заводов в Европе и США. Концентрация диоксинов в почве будет нарастать с каждым годом на протяжении всего времени его эксплуатации, так как диоксины естественным образом распадаются в почве в течение не менее чем 100 лет [154].

Другой широко известной технологией переработки углеводородного сырья является получение пиролизного и синтез-газа (в процессе термического разложения (пиролиза) или частичного окисления), который используется для производства спиртов, синтетических материалов. Горение происходит при температуре 400-600 °C. К составу такого синтез-газа предъявляются относительно высокие требования: соотношение H_2/CO должно составлять 2:1, общий объем примесей (CO_2 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4), в том числе смол, не должен превышать 1%. При переработке твердых коммунальных отходов в рамках известных технологий генерации синтез-газа, как правило, не удастся обеспечить получение продукта с указанными характеристиками, который содержит смолы в достаточно большом количестве. По-

этому такой синтез-газ из твердых коммунальных отходов преимущественно сжигается для генерации тепловой энергии. Однако при реализации такого способа утилизации твердых коммунальных отходов повышенное внимание должно уделяться решению вопросов взрывопожароопасности технологического процесса при хранении и транспортировке горючего газа [48].

Биогаз из твердых коммунальных отходов можно получать и по технологии гидросепарации [49]. К сожалению, эта технология пока не реализована, имеются лишь экспериментальные данные. Подобные подходы менее вредные, чем при сжигании на колосниковых решётках и в слоевых топках. Однако они пока не получили широкого распространения из-за сложного технологического процесса.

Наиболее экологически безопасными являются высокотемпературные и электроплазменные технологии сжигания твердых коммунальных отходов, т.к. при температурах процесса выше 1300 °С происходит полное разложение наиболее вредных веществ (диоксинов и фуранов) до простейших составляющих [138]. Поэтому отсутствует необходимость применения дорогостоящих систем очистки дымовых газов. Но для поддержания относительно высокой температуры в топке необходимо использовать специализированное термическое или электроплазменное оборудование. Как правило, для обеспечения функционирования такого оборудования расходуется высококачественное топливо или затрачивается энергия в большем количестве, чем она выделяется при сжигании твердых коммунальных отходов. Несмотря на очевидное преимущество по экологическим показателям электроплазменных технологий утилизации твердых коммунальных отходов при температурах в объеме реактора более 1300 °С они не получили широкого применения на практике и используются преимущественно для утилизации опасных медицинских отходов [47].

При обобщении выше сказанного можно отметить, что за последние 25–30 лет разработана большая группа различных подходов к утилизации твердых коммунальных отходов. Существенный вклад внесли известные специалисты такие как: Тугов А.Н., Москвичев В.Ф. [132–136] (исследовавшие взаимосвязанные фи-

зико-химические процессы и разрабатывающие технологии энергетической утилизации коммунальных отходов на ТЭС); Мессерле В.Е., Моссэ А. Л., Устименко А. Б. [137,138] (разрабатывающие технологии плазменной газификации ТКО с использованием кислородной неравновесной плазмы); Алексеенко С.В. и др. [110], (разрабатывающие электроплазменные системы для переработки или газификации органических отходов производительностью 10-20 кг/ч с получением синтез-газа) и др. Кроме этого были разработаны экспериментальные методики, физические и математические модели горения твердых коммунальных отходов в различных условиях. Однако использование установок и полученных экспериментальных данных затруднено низкой рентабельностью практически всех существующих решений [133]. Минимальные затраты на внедрение должны стать определяющим фактором в ходе использования твердых коммунальных отходов для получения энергии.

1.4. Сложности утилизации коммунальных отходов

В Европе технологии переработки мусора распространены достаточно широко, например, в Дании и Швеции [50, 51]. В тоже время в некоторых странах (в частности, Франции, Италии, странах Восточной Европы) практика переработки мусора не стала общенациональной. Ресурсная самообеспеченность России – один из факторов, препятствующий распространению переработки мусора [133]. В России имеются большие и в том числе еще не исследованные запасы нефти, газа и угля [7]. Поэтому идея о получении энергии из твердых коммунальных отходов не находит поддержки у промышленных предприятий. Практически все системы переработки твердых коммунальных отходов в энергетических целях требуют значительных капитальных затрат и дотаций [52]. К тому же требуется существенное вложение средств в инфраструктуру по переработке ТКО [53].

Несмотря на внушительное количество мусора, выработка в больших объемах электроэнергии может быть затруднена. В Дании и Швеции компаниям даже приходится покупать мусор за границей, чтобы сжигать его для выработки энергии

[50]. Другая проблема касается реализации полученной теплоты или электроэнергии в условиях ее переизбытка, так как на полученную энергию может быть низкий спрос [54].

При действующей системе тарифов выгоднее вывозить мусор на свалки. Например, в США утилизировать ТКО на полигоне стоит 1000 долларов за тонну. В России цена такой услуги 500–1000 рублей [52–54]. В настоящий момент транспортировка мусора – единственный прибыльный элемент в системе работы с твердыми коммунальными отходами. Отдельные перевозчики предпочитают не довозить отходы до свалки, а сгружают их в лес и поля [57].

Закрытие и ликвидирование полигонов, перенос на более отдаленное расстояние в случае жалоб населения, например, при расширении полигона или расширении жилого пространства в ряде случаев, наоборот, приводят к отрицательным последствиям. Из-за отсутствия регламентированных полигонов, либо их значительной удаленности образуются нелегальные свалки [55]. В ряде случаев население активно выступает против строительства мусоросжигательных заводов. Кроме того, так как крупные компании такие, например, как «Coca-Cola» стали переходить вместо стеклянной тары на одноразовую тару, и основным сырьем для нее стал пластик. Это позволило крупнейшим транснациональным компаниям существенно снизить издержки и увеличить прибыль. Однако мусора с середины прошлого века стало значительно больше [56, 57]. Заставить компании, производящие значительное количество мусора, заниматься его утилизацией очень сложно. Как следствие, проблема утилизации твердых коммунальных отходов стоит очень остро, предложенные способы изобилуют недостатками и саботируются на различных этапах. Требуются новые эффективные решения и качественный контроль над ними.

Перспективным в данном направлении является способ утилизации твердых коммунальных отходов путем включения его как горючего компонента в состав жидких композитных топлив [141]. КЖТ представляет собой смесь из двух и более компонентов в различных пропорциях, один из которых обязательно является го-

рючим элементом (каменные и бурые угли, торф, отходы углеобогащения, нефтяной кокс и др.). Применение КЖТ имеет ряд положительных преимуществ [141]:

- полученное топливо обладает гораздо более выгодными условиями с позиции энергетического использования, чем каждая из первоначальных составляющих. Известно, что ТКО по сравнению, например, с углем горит намного хуже и достигает меньших температур. Применяя же КЖТ можно добиться таких же высоких температур, как и при сжигании угля [59];
- вовлечение твердых коммунальных отходов в состав КЖТ является более экологичным (т.е. с гораздо меньшим количеством вредных газов) по сравнению с прямым сжиганием твердых коммунальных отходов. Затраты на обновление фильтров могут значительно снизиться [60, 156];
- помимо твердых коммунальных отходов в состав КЖТ входят отходы углеобогащения, что также является большой проблемой, но уже для промышленности. Отходы углеобогащения имеют значительные запасы, особенно в регионах с большой угледобычей [61];
- кроме отходов углеобогащения, в состав КЖТ могут входить отработанные масла и прочие горючие смеси, которые складываются в больших объемах на предприятиях и не используются [62, 157];
- для применения КЖТ не требуется строительство нового мусоросжигательного завода. Достаточно произвести модернизацию топочной камеры и системы топливоприготовления на уже существующих котельных большой и малой энергетики [63];
- благодаря использованию КЖТ можно существенно экономить на топливе, используемом на котельных в настоящий момент, за счет того, что твердые коммунальные отходы, а также отработанные масла и отходы углеобогащения являются, по сути, бесплатным энергетическим ресурсом;
- благодаря жидкой консистенции КЖТ может использоваться для передачи с места производства к месту сжигания за счет применения трубопроводного, железнодорожного и других видов транспорта [64, 158].

Выводы по первой главе

1. Большие темпы формирования и открытое складирование твердых коммунальных отходов являются мировой экологической проблемой. Существующие способы утилизации имеют множество недостатков и объективно не могут существенно снизить объемы складироваемых твердых коммунальных отходов. Как следствие, на данный момент наиболее распространено захоронение твердых коммунальных отходов на полигонах.
2. Несмотря на активные исследования, выполненные в последние годы, вопрос переработки и утилизации отходов в России, Европе и других регионах мира не решен в полной мере. Из более эффективных способов практикуется слоевое сжигание на мусоросжигающих заводах, но прямое сжигание твердых коммунальных отходов связано с целым рядом экономических, экологических и социальных проблем.
3. Сложившаяся ситуация требует разработки новых эффективных и экономически привлекательных технологий, а также способов, которые не только будут способствовать производству энергии с максимально возможной экологической безопасностью, но и эффективно утилизировать твердые коммунальные отходы, аккумулированные объемы которых увеличиваются с каждым годом.
4. Системы сжигания твердых коммунальных отходов с применением плазматронов, как правило, требуют специализированных условий, которые можно обеспечить при строительстве новых установок. Внедрение таких установок на действующих котельных большой и малой энергетики крайне затруднительно. Строительство новых установок требует больших финансовых расходов. Вопросы окупаемости чрезвычайно сложные. Как следствие, довольно много дискуссий по выбору оптимальных методов утилизации твердых коммунальных отходов.
5. Сжигание твердых коммунальных отходов в составе КЖТ на действующих котельных установках большой и малой энергетики может стать перспективным способом утилизации отходов. Требуется проведение экспериментов по

определению необходимых и достаточных условий для устойчивого инициирования горения таких сложных смесей, а также оптимальных концентраций компонентов для получения максимальных относительных индикаторов эффективности топлив с учетом экологических, экономических и энергетических показателей. Можно уменьшить затраты на фильтры, избавиться от необходимости строить мусоросжигательные заводы, утилизировать не только коммунальные, но промышленные отходы, уменьшить затраты на натуральное топливо для котельных установок большой и малой энергетики.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ СТЕНДЫ

2.1. Планирование экспериментальных исследований

Известна группа методик исследования процессов зажигания и последующего горения капель в различных условиях, перспективных для котельных установок большой и малой энергетики суспензий ВУТ и ОВУТ: на разогретой массивной поверхности [65-67]; с помощью излучения [68] и искрового разряда [69] (условия близки к радиационному нагреву); методом подвешивания капли на спаяе термопары и держателях в разогретом газовом потоке [68] (конвективный нагрев). Известны также результаты исследований процессов зажигания и горения свободно падающих капель перспективных суспензий ВУТ и ОВУТ через цилиндрический канал в ламинарном потоке разогретого воздуха в диапазоне температур от 1000 до 1200 °С [70, 71], а также витающих капель. Данные методики позволяют исключить влияние подвешивающего каплю держателя [112]. Однако проведенные эксперименты показали слабое влияние этого фактора в случае использования малоинерционной термопары.

Помимо влияния материала держателя на характеристики зажигания капли суспензий ВУТ и ОВУТ большое значение имеют условия нагрева, в которых сжигается исследуемое топливо. Известны результаты исследований процессов зажигания и горения капель различных топлив в условиях конвективного нагрева в потоке разогретого воздуха [59], а также в условиях лучистого нагрева [21]. Для практического применения наибольший интерес представляют результаты исследования процессов зажигания капель композитного жидкого топлива в условиях конвективного нагрева. Однако применение разных экспериментальных методик позволяет выполнить более полный анализ влияния разных условий взаимодействия капель с окружающей средой при нагреве на характеристики процесса зажигания.

Также одними из основных исследуемых характеристик являются концентрации антропогенных выбросов, образующихся при горении суспензий ВУТ и ОВУТ [73]. Применяется группа подходов к сжиганию топлив для исследования антропо-

генных выбросов [73]: слоевое; факельное; вихревое; в кипящем (псевдосжиженном) слое. Оптимальным решением с учетом лабораторных ограничений является переход к условиям слоевого сжигания. Оно обеспечивает возможность сжигания небольшой навески топлива массой от 1 до 2 г (для полного выгорания). Образующиеся при этом продукты сгорания (дымовые газы) сконцентрированы в малом объеме камеры сгорания, что значительно упрощает процесс регистрации концентраций антропогенных выбросов при помощи современных газоанализаторов.

2.2. Характеристики и свойства компонентов КЖТ

В качестве основного компонента КЖТ используют угольную пыль, перемешанную с водой, либо отходы углеобогащения (фильтр-кек). Фильтр кек получается путем обработки угольной породы водным раствором в специальных емкостях и фильтр-прессах. После данной процедуры (метод флотации [73]) фильтр-кек представляет собой мелкодисперсные частицы угля (около 100 мкм) перемешанные с водой. Как правило, на углеобогачительных фабриках полученный фильтр-кек складировуют на открытых полигонах. Это ведет к загрязнению больших территорий угольной пылью и ухудшению экологической обстановки. В рамках диссертационных исследований в состав КЖТ добавлялись измельченные (около 140 мкм) твердые коммунальные отходы. Для интенсификации процесса зажигания в КЖТ в некоторых экспериментах добавлялось отработанное жидкое горючее. Добавление твердых коммунальных отходов либо отработанных масел не превышало 20% от всей массы КЖТ, так как в случае превышения этого порога, полученная смесь становилась слишком вязкой и не подходила по использованию в качестве жидкого топлива. Также для улучшения реологических свойств в некоторых экспериментах использовался пластификатор, его присутствие в составе не превышало 1-2%.

В таблицах 2.1–2.3 приведены основные свойства исследованных компонентов КЖТ.

Таблица 2.1. Характеристики компонентов [109,148]

Компонент	$Q_{s,}^a$ МДж/кг	$V^{daf}, \%$	$A^d, \%$	$W^a, \%$
Уголь 3Б	23.36	46.62	3.85	15.52
Уголь 2Б	22.91	47.63	4.12	14.11
Уголь 1Б	17.30	61.47	22.84	10.15
Кек К	24.83	23.08	26.46	—
Уголь К	29.76	27.03	14.65	2.05
Кек СС	15.23	30.16	50.89	—
Уголь СС	26.23	27.40	21.68	2.76
Кек Т	26.92	16.09	21.20	—
Уголь Т	27.65	15.07	18.07	2.89
Уголь Д	24.82	40.19	8.52	10.09
Остаток после пиролиза автомобильных шин	26,44	20,14	13,10	1,39
Древесина	16.45	—	2.0	20.0
Пищевой отход (очистки картофеля)	16.91	—	1.0	78.6
Резина	33.50	—	1.8	2.0
Пластик	22.00	—	0.2	2.0
Картон	17.50	—	3.0	5.0

Таблица 2.2. Элементный состав компонентов топлива [103, 109]

Компонент	$O^{daf}, \%$	$H^{daf}, \%$	$S^{daf}, \%$	$N^{daf}, \%$	$C^{daf}, \%$
Уголь 3Б	17.25	7.201	0.304	0.71	74.52
Уголь 2Б	18.99	6.516	0.435	0.79	73.25
Уголь 1Б	27.13	6.896	0.384	0.62	64.86
Кек К	4.46	5.090	1.022	2.05	87.20
Уголь К	12.70	4.486	0.868	1.84	79.79
Кек СС	4.77	5.039	0.444	2.15	87.47

Таблица 2.2. Элементный состав компонентов топлива (продолжение)

Уголь СС	15.32	4.783	0.326	1.93	77.30
Кек Т	2.77	4.255	0.441	2.31	90.13
Уголь Т	5.03	4.104	0.526	2.23	87.97
Уголь Д	13.64	6.253	0.347	2.27	77.46
Древесина	43.4	6.0	0.1	0.2	50.3
Пищевой отход (очистки картофеля)	49.1	6.5	0.2	2.1	42.1
Резина	–	1.2	0.6	0.3	97.9
Пластик	25.4	7.9	–	–	66.7
Картон	46.9	6.3	0.2	0.3	46.3

Таблица 2.3. Основные характеристики отработанных масел [109]

Отработанные масла	Q^a , МДж/кг	A_d , %	t_{ign} , °C	W^a , %	t_f , °C	ρ , кг/м ³ (20 °C)
Моторное	44	0.78	218	0.28	132	871
Турбинное с примесями	45.1	0.03	245	–	217	869
Турбинное	44.99	0.03	193	–	175	868
Трансформаторное	44.98	–	169	–	159	877
Трансформаторное с примесями	43.08	0.01	108	< 0.03	83	861

2.3. Метод приготовления КЖТ

Твердые коммунальные отходы (картон, древесина, резина, пластик) измельчались по отдельности при помощи режущей мельницы SW-2 (Частота вращения ножей: 30 000 об/мин). Полученные образцы разных твердых коммунальных отходов просеивались через сито со стандартным размером ячеек 140 мкм по ISO 3310:2000. Таким образом, для приготовления топливных составов использовались компоненты (фильтр-кек и ТКО) с размерами частиц менее 140 мкм.

Далее для проведения экспериментов готовились топливные составы. Приготовление смесей КЖТ осуществлялось при температуре 20 °С, давлении 101.3 кПа и влажности воздуха 80%. Компоненты топлив перемешивали в емкости объемом 0.2 л мешалкой DC-600RM (HT Machinery, Япония-Тайвань) при 600 об/мин. в течение 15 минут. На первом этапе создавалась водомасляная эмульсия с учетом относительных массовых концентраций масла, воды и пластификатора. Компоненты взвешивались аналитическими весами ViBRA HT 84RCE, затем помещались в емкость для смешивания. Перемешивание компонентов эмульсий длилось в течение 3 мин. Затем в водомасляную эмульсию вводился угольный компонент в соответствии с требуемой относительной массовой концентрацией, и компоненты смешивались до однородной структуры. Длительность перемешивания суспензии составляла 10 минут. Подготовленные образцы ОБУТ объемом около 0.25 дм³ помещались в стеклянные герметичные емкости. Вязкость топливных композиций, измеренная ротационным вискозиметром ЭАК-1М, при температуре около 20 °С изменялась в диапазоне 0.2–0.25 Па·с с учетом варьирования концентрации угля в составе ОБУТ от 45 % до 60 %.

2.4. Используемые экспериментальные стэнды

Исследования процессов зажигания и горения капель композитных жидких топлив выполнены с использованием трех экспериментальных стэндов (рисунки 2.1-2.3). Стенд № 1 позволяет реализовать условия конвективного лучистого нагрева неподвижной капли топлива в муфельной печи при варьировании температуры в диапазоне 400–1000 °С. Стенд № 2 позволяет реализовать условия конвективного нагрева аналогичной капли топлива в потоке разогретого воздуха (3 м/с) при варьировании его температуры в диапазоне 400–700 °С. Для анализа концентрации вредных газов в газообразных продуктах сгорания топлива использовался стенд № 3. Применение разных экспериментальных методик позволяет выполнить более полный анализ влияния разных условий взаимодействия капель с окружающей средой при нагреве на характеристики процесса зажигания топлива. При близ-

ких к предельным условиям зажигания характеристики индукционного периода будут достаточно существенно зависеть от закономерностей фазовых превращений при разных механизмах теплопередачи к капле жидкости [21].

Преимуществом стенда № 1 является широкий диапазон варьирования температуры. Ее значения могут превышать $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такие температуры характерны для технологических процессов сжигания твердого топлива в топках котлов [57]. В условиях интенсивного нагрева капли топлива увеличение температуры окислителя более $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ менее существенно влияет на изменение времени задержки зажигания. Поэтому в качестве верхнего предела диапазона варьирования температуры принято значение $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. На другом стенде верхним пределом диапазона варьирования температуры окислителя является значение $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, обусловленное техническими характеристиками нагревательного оборудования. Стенд № 2 позволяет в лабораторных условиях моделировать процессы взаимодействия капель топлива с потоком разогретого воздуха [140].

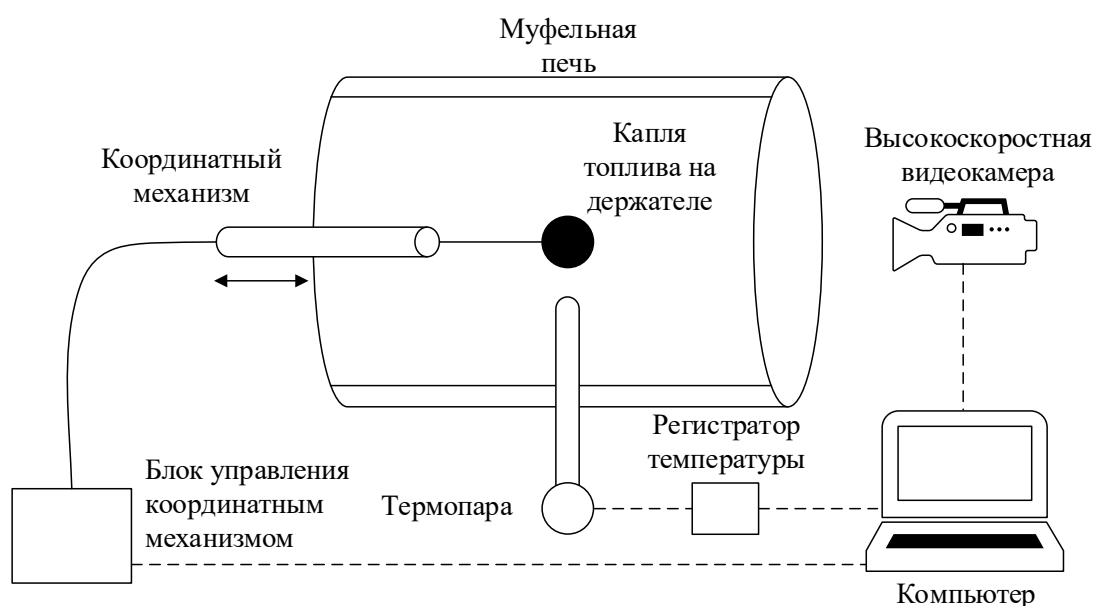


Рисунок 2.1. Схема экспериментального стенда № 1 для исследования горения топлива в условиях конвективного и лучистого теплообмена

Основное отличие экспериментальных стендов (рисунки 2.1, 2.2) состоит в применении разного оборудования для создания условий, необходимых для зажигания капель топлива. На стенде № 1 (рисунок 2.1) в качестве такого оборудования

использовалась трубчатая муфельная печь Nabertherm R 50/250/13. На стенде № 2 (рисунок 2.2) поток разогретого воздуха генерировался нагревателем LEISTER LE 5000 HT и воздушным вентилятором LEISTER ROBUST в стеклянном цилиндре (внутренний диаметр 0.1 м, длина 0.5 м). Температура потока воздуха на выходе нагревателя регулируется по сигналу встроенной термопары HCX TXA. Основные средства измерения и регистрации, их диапазоны измерения и погрешности представлены в таблице 2.5.

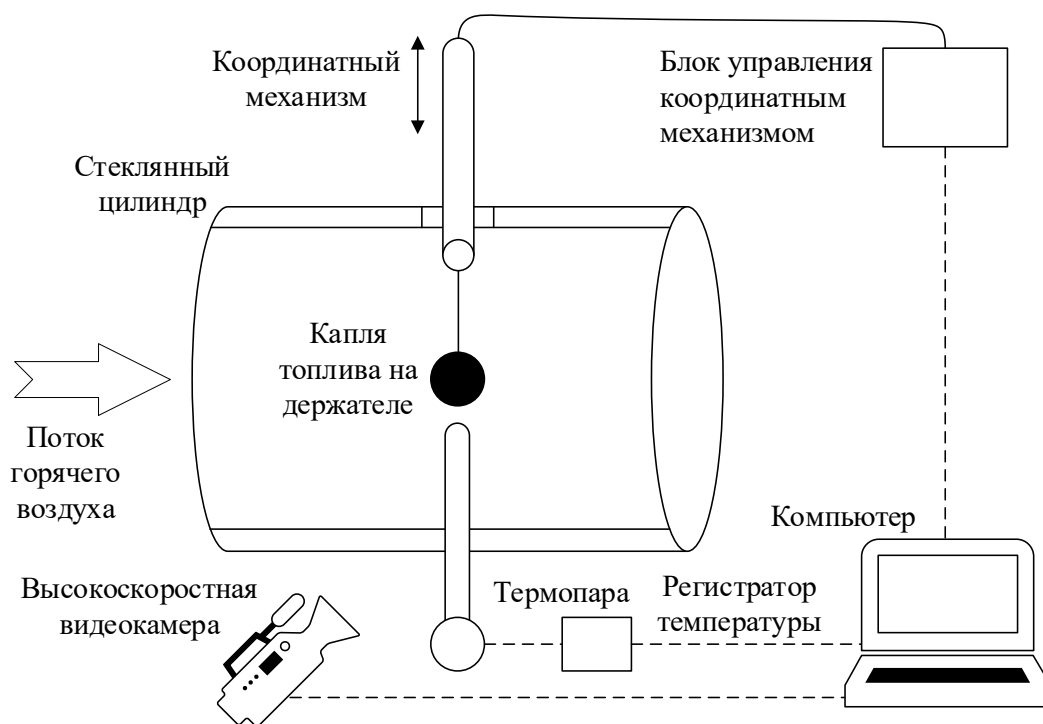


Рисунок 2.2. Схема экспериментального стенда № 2 для исследования горения топлива в условиях конвективного теплообмена

Введение капель топлива в рабочую зону осуществлялось при помощи координатного механизма (рисунки 2.1, 2.2), скорость перемещения которого не превышала 0.5 м/с для предотвращения деформации и соскальзывания капли с керамического держателя при движении. На стенде № 1 (рисунок 2.1) капля топлива вводилась в керамическую трубку через одно из торцевых отверстий вдоль оси симметрии трубки. Со стороны противоположного отверстия высокоскоростной видеокамерой регистрировались протекающие процессы. На стенде № 2 (рисунок 2.2) капля топлива вводилась в стеклянный цилиндр перпендикулярно направлению

движения потока воздуха до уровня оси симметрии через отверстие, выполненное в стенке. Видеокамера расположена перпендикулярно направлению движения потока воздуха.

Таблица 2.5. Характеристики средств измерения и регистрации

Средства измерения и регистрации	Диапазон	Погрешности
Температура t_g в трубчатой ($d=0.04$ м, $l=0.45$ м) муфельной печи Nabertherm R 50/250/13 контролировалась встроенной термопарой (НСХ ТХА)	20-1200 °С	± 1 °С
Температура t_g генерируемого нагревателем LEISTER LE 5000 НТ в стеклянном цилиндре ($d=0.1$ м, $l=0.5$ м) контролировались тремя термопарами (НСХ ТХА)	20-1200 °С	± 1 °С
Скорость V_g потока разогретого воздуха, генерируемого воздушным вентилятором LEISTER ROBUST, в стеклянном цилиндре ($d=0.1$ м, $l=0.5$ м) контролировались анемометром Мегеон 11003 (диапазон измерений 0–30 м/с, погрешность $\pm 5\%$)	0-30 м/с	$\pm 5\%$

При проведении экспериментов в сечениях, соответствующих расположению капли топлива (рисунки 2.1-2.3) контролировалась температура газовой среды t_g термопарой НСХ ТХА. (диапазон измеряемых температур 0–1100 °С, точность при измерении температур более 400 °С составляет $\pm 0.004T$, инерционность не более 3 с). Также до начала проведения экспериментов контролировалась концентрация кислорода в этих сечениях, которая составляла около 20%. Для измерений использовался газоанализатор Testo 340.

При проведении экспериментов контролировались следующие параметры: температура (t_g) разогретого воздуха, его скорость (V_g) в условиях конвективного нагрева, радиус (R_d) капли, время горения капли. Протекающие при зажигании и горении капель топлива процессы регистрировались высокоскоростной монохром-

ной видеокамерой Phantom Miro M310. Программно-аппаратный комплекс высокоскоростной видеорегистрации позволял проводить детальный анализ закономерностей процесса горения и автоматически рассчитывать время задержки зажигания (τ_d). Значения τ_d определялись по эволюции светимости капли во времени в рамках алгоритма Threshold, реализованного группой процедур программного обеспечения Tema Automotive. Случайные погрешности для серий из 5–7 экспериментов, проведенных при идентичных условиях, с доверительной вероятностью 0.95 составляли менее 10%. Систематические погрешности определения времен τ_d не превышали 3%.

При проведении экспериментов капли топлива генерировались электронным дозатором Finnpiquette Novus со специальной насадкой. При помощи алгоритмов ПО Tema Automotive автоматически измерялось четыре размера капли в различных сечениях. Диаметр капель составлял 1–2 мм. Этот параметр контролировался по начальным кадрам видеозаписи (до нагрева капли). Полученные значения усреднялись, вычислялся радиус капли R_d . Систематическая погрешность определения R_d при использованных настройках разрешения высокоскоростной видеокамеры не превышала 4%.

С целью оценки масштабов увеличения концентраций антропогенных выбросов при сжигании топливных композиций с добавлением отработанного масла, а также для анализа влияния ТБО в составе композиционного топлива на изменение указанных характеристики выполнены экспериментальные исследования в рамках хорошо апробированной методики [73, 74]. Анализ состава газообразных продуктов сгорания топлива выполнен с использованием экспериментального стенда (рис. 2.3). Газоанализатор Testo 340 монтировался на стенде вместо высокоскоростной видеокамеры. Этот газоанализатор имеет четыре сенсора: O_2 (диапазон 0–25%, погрешность $\pm 0.2\%$, разрешение 0.01%), CO (диапазон 0–10000 ppm, погрешность $\pm 10\%$, разрешение 1 ppm), NO_x (диапазон 0–4000 ppm, погрешность $\pm 5\%$, разрешение 1 ppm), SO_2 (диапазон 0–5000 ppm, погрешность $\pm 10\%$, разрешение 1 ppm). Концентрации CO_2 (диапазон 0–25%, погрешность $\pm 0.2\%$, разрешение

0.1%) рассчитывались газоанализатором автоматически по значениям концентраций O_2 . Образец топлива массой 1 г вводился в муфельную печь, предварительно разогретой до заданной температуры. Такое минимально допустимое количество топлива обусловлено техническими характеристиками используемого газоанализатора. Для получения достоверных результатов измерений необходимо выполнение условия по минимальному объему анализируемых дымовых газов. Одновременно с образцом топлива в полость печи вводился зонд газоанализатора для забора дымовых газов. При проведении экспериментов оба отверстия керамической трубки герметично закрывались теплоизоляционным материалом для предотвращения утечки дымовых газов в окружающую среду. При идентичных начальных условиях проводились серии из 3–5 экспериментов. Полученные результаты представлены в виде средних значений экспериментальных данных.

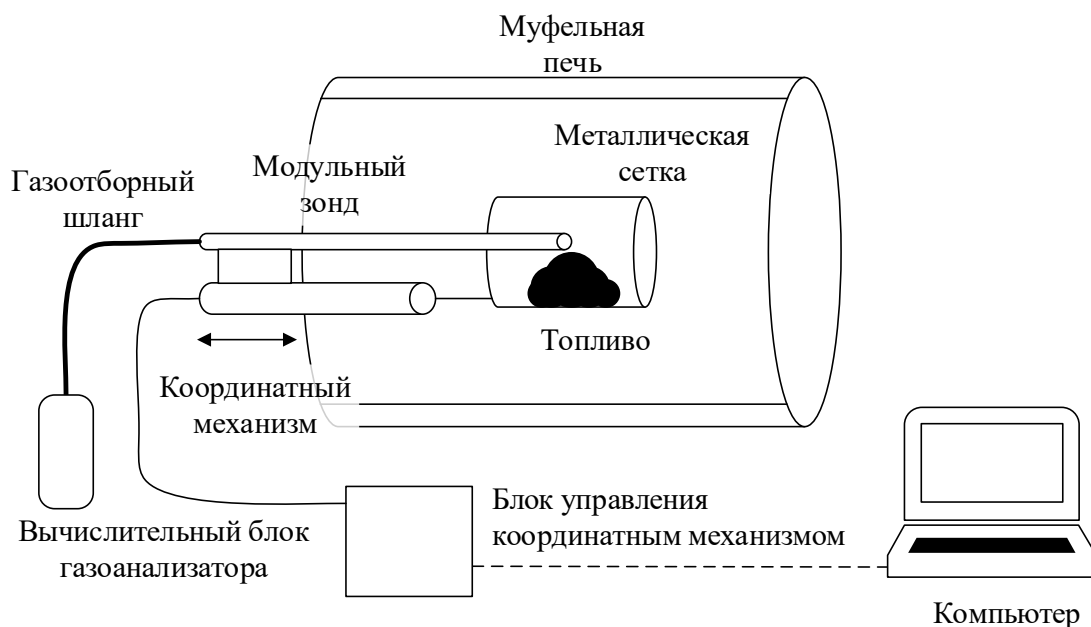


Рисунок 2.3. Схема экспериментального стенда № 3 для регистрации антропогенных выбросов

Выводы по второй главе

1. Определены разновидности наиболее распространённых отходов углеродной переработки, отработанных масел и твердых коммунальных отходов, установлены их характеристики для последующих экспериментальных исследований.

ний перспективности использования многокомпонентного топлива при сжигании в топочных камерах угольных котельных установок большой и малой энергетики.

2. Разработаны экспериментальные методики с использованием трех стендов и специализированных модельных камер сгорания для изучения процессов зажигания и горения капель КЖТ с варьируемой температурой (до 900 °С), а доминирующим способом нагрева (кондуктивный, конвективный, радиационный).
3. Использование трех экспериментальных стендов, комбинирование механизмов подвода энергии к поверхности капель топлив позволяет учесть группу основных факторов и максимально приблизить условия эксперимента к топочным процессам в котельных установках большой и малой энергетики, т.е. обеспечивается возможность адаптации результатов исследований под водогрейные и паровые котельные агрегаты.
4. При проведении экспериментов варьировалась температура газовой среды, в которую помещалась капля топлива. Помимо этого, варьировались концентрации добавленных компонентов в КЖТ, использовались различные составы КЖТ, изменялся размер капель, тонина помола используемого топлива, время приготовления топлива.
5. При проведении экспериментов регистрировались следующие параметры: минимальная температура зажигания, максимальная температура горения, время задержки зажигания, длительность горения капли. Чем выше концентрация твердых коммунальных отходов в составе КЖТ, тем больше количество экспериментов в серии вследствие роста интенсивности фрагментации капель топлив.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КАПЕЛЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ С ТКО

3.1. Основные характеристики процессов зажигания и последующего горения

В выполненных диссертационных исследованиях композиционное топливо представляло смесь частиц угля (или кека) и коммунальных отходов, воды и жидкого горючего компонента. В реальных топочных камерах капли КЖТ попадают в высокотемпературную окислительную среду, где осуществляется испарение влаги, (с поверхности, а затем из пористого каркаса частиц угля). Аналогичные процессы регистрировались в проведенных экспериментах. Процесс испарения влаги сопровождался образованием и нагревом пористого прочного конгломерата частиц угля с высоким термическим сопротивлением. Установлено, что в составе КЖТ есть жидкий горючий компонент, то последний испаряется и воспламеняется первым. При достижении температуры воспламенения угольные частицы в агломерате воспламеняются. К концу процесса испарения вместо капли образуется полая сфера (ксеносфера), которая состоит только из частиц золы угля суспензии после выгорания. Влага топлива активно участвует в реакции окисления углерода: $C + H_2 \rightarrow CO + H_2$. Оксид углерода CO и водород H_2 догорают вокруг поверхности образовавшегося агломерата капли.

Время задержки зажигания является основной характеристикой процесса инициирования горения топлива [128]. Значение этого параметра, как правило, прямо пропорционально плотности, вязкости и поверхностному натяжению топлива, которые определяют качество распыления топлива [128], и обратно пропорционально удельной теплоте сгорания. Например, более тяжелый фракционный состав топлива ухудшит качество его распыления в камере сгорания из-за повышенной плотности, вязкости и поверхностного натяжения, что вызывает увеличение диаметра капли и, как следствие, увеличение времени задержки зажигания [128].

Время задержки зажигания в значительной степени определяет последующее течение всего процесса горения. Если время задержки зажигания велико, количество топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания в момент его воспламенения, увеличивается, количество испаренного топлива возрастает, топливовоздушная смесь становится более однородной, и степень ее химического воспламенения подготовка (фрагментация и окисление) улучшается. Это приводит к интенсивному сгоранию во взрывном режиме большого объема смеси, что вызывает резкое повышение давления и может привести к выходу из строя камеры сгорания [128]. Достижение низкого значения времени задержки зажигания является важной задачей в ходе экспериментов. Такую задачу можно решить путем варьирования соотношения компонентов КЖТ, а также условий нагрева.

Помимо времени задержки зажигания в качестве малоисследованных до настоящего времени остались условия и характеристики процессов зарождения и распространения фронта выгорания по поверхности капли композиционных топлив. Чем шире экспериментальная база данных с основными известными характеристиками процессов зажигания и выгорания топливных композиций на основе отходов угле- и нефтепереработки, тем больше возможностей достоверного прогнозирования условий и характеристик их эффективного сжигания.

3.2. Анализ влияния компонентного состава органоводоугольного топлива на характеристики зажигания

Проведенные эксперименты показали, что для капель композиционного жидкого топлива при нагреве в потоке окислителя характерны несколько стадий (рисунок 3.2.1) [60, 63]. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов. После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Заканчивается все прогревом твердого остатка, его гетерогенным зажиганием и горением. [81].

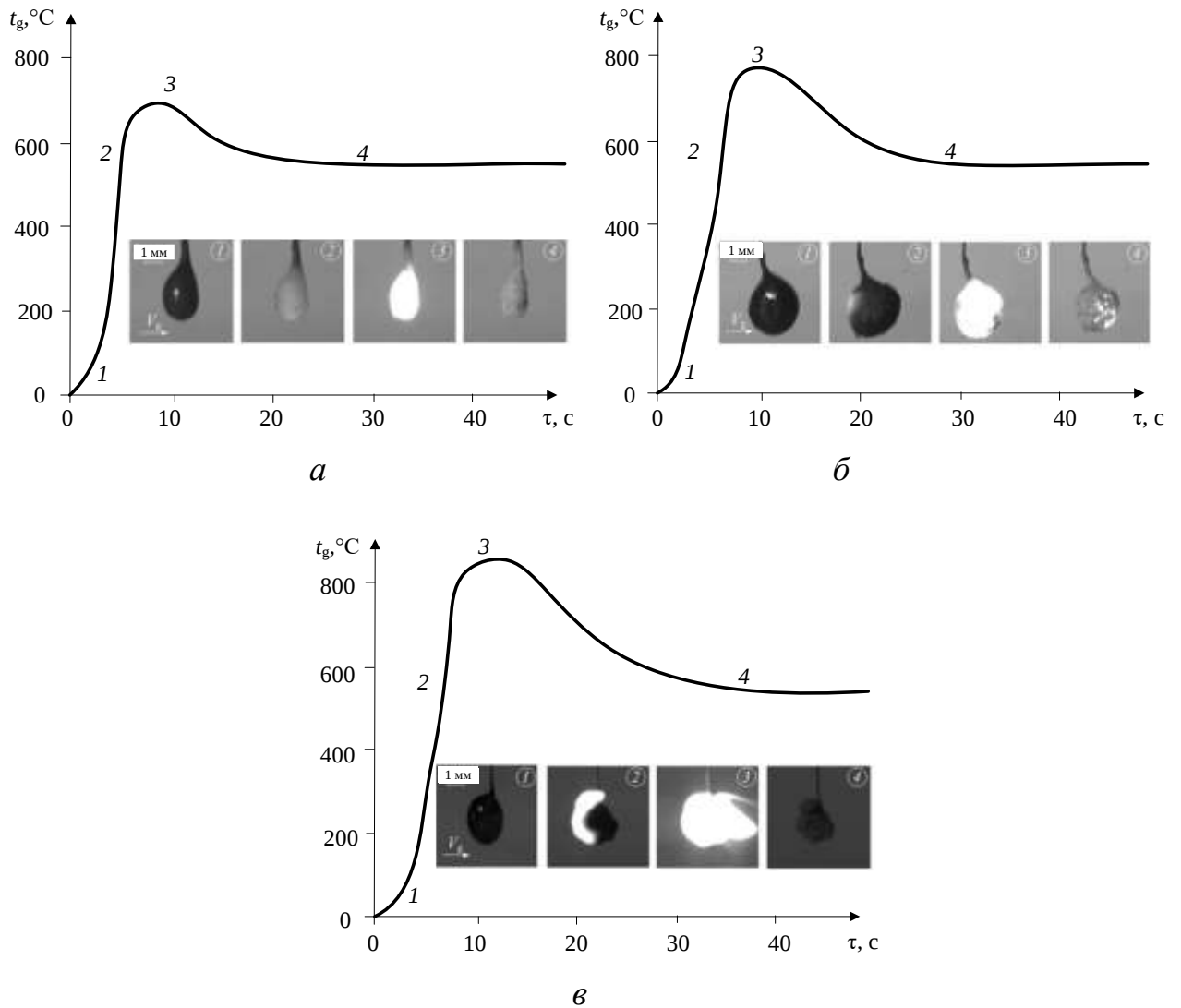


Рисунок 3.2.1. Изменение температуры капли композиционного жидкого топлива ($R_d \approx 1$ мм) при взаимодействии с потоком разогретого воздуха ($t_g \approx 600$ °C и $V_g \approx 5$ м/с) для составов [109]: *a* – 50 % бурый уголь марки «Б2», 39 % вода, 10 % моторное масло отработанное, 1 % пластификатор; *б* – 94 % Кек (влажный) каменного угля марки «К», 5 % моторное масло отработанное, 1 % пластификатор; *в* – 79 % Кек (влажный) каменного угля марки «Т», 20 % моторное масло

Процент содержания компонентов в КЖТ влияет на длительность различных стадий и всего процесса зажигания. Содержание влаги в КЖТ играет значительную роль в ходе прогрева, влияет на интенсивность фазовых переходов и окисления продуктов испарения горючего и продуктов разложения угля. На рисунке 3.2.2 представлены времена задержки зажигания капель композиционного жидкого топ-

лива (τ_d) при варьировании относительной массовой доли воды (ϕ_w). В случае увеличения концентрации воды усиливается влияние эндотермических фазовых переходов на интенсивность физико-химических процессов. Это связано с высоким значением теплоты фазового перехода (около 2 МДж/кг).

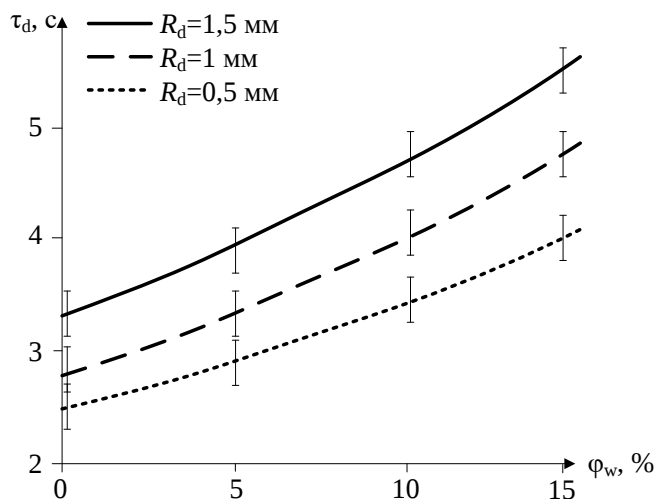


Рисунок 3.2.2. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли воды в составе ОБУТ ((79–94) % Кек (влажный) каменного угля марки «К», (0–15) % вода, 5 % трансформаторное масло отработанное, 1 % пластификатор) [109]

Нелинейное изменение времени задержки зажигания на 30–40 % с ростом концентрации воды $0 < \phi_w < 15$ % в капле композиционного жидкого топлива при $0,5 < R_d < 1,5$ мм достаточно очевидно. Это обусловлено соответствующим изменением концентрации вдуваемых с поверхности капли композиционного жидкого топлива в окружающую среду паров горючей жидкости и воды, а также газообразных продуктов термического разложения органической части угля. Возрастала доля паров воды относительно концентрации других компонентов. При повышении температуры окислителя влияние фактора повышения концентрации воды в составе композиционного жидкого топлива на длительность зажигания ослабевала. Эту особенность можно объяснить тем, что скорости газозафазного и гетерогенного экзотермических процессов при зажигании капли композиционного жидкого топлива, возрастают по экспоненциальной зависимости при увеличении температуры источника нагрева (в соответствии с законом Аррениуса). В свою очередь, зависимости этих параметров от концентрации компонентов парогазовой смеси являются

степенными. Поэтому при увеличении температуры окислителя изменение концентрации компонентов горючей смеси влияет менее значительно на характеристики зажигания капли композиционного жидкого топлива.

Увеличение массовой доли обогащенного угля в композиционном жидком топливе имеет обратный эффект. Повышение концентрации угольной пыли приводит к изменению вязкости смеси и теплопроводности. Как следствие, уменьшается время инертного прогрева капли композиционного жидкого топлива и возрастает скорость протекания всех последующих стадий зажигания. На рисунке 3.2.3 представлены времена задержки зажигания капель композиционного жидкого топлива при варьировании массовой доли обогащенного угля (φ_c).

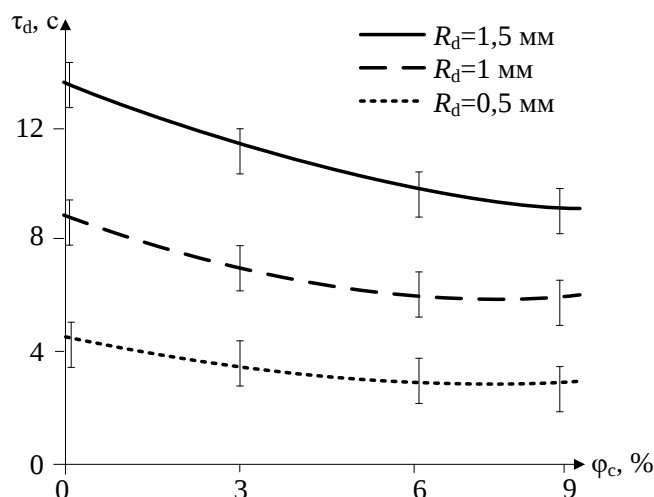


Рисунок 3.2.3. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли обогащенного угля для состава: ((79–89) % Кек (влажный) каменного угля марки «К», (0–10) % каменный уголь марки «К», 10 % моторное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $t_g \approx 600$ °C и $V_g \approx 5$ м/с [109]

Установленные зависимости (рисунок 3.2.3) можно объяснить влиянием соотношения тепловых эффектов фазовых переходов и реакций окисления при изменении концентрации компонентов композиционного жидкого топлива. Теплота эндотермического фазового перехода (испарения) более чем в десять раз превышает аналогичный параметр для процесса термического разложения органической части угля. Как следствие, с ростом концентрации угля расходуется меньше энергии, аккумулированной каплей композиционного жидкого топлива в течение инертного

нагрева, на инициирование процесса горения. Концентрация летучих возрастает в окрестности капли композиционного жидкого топлива, что ведет к ускорению процессов зажигания парогазовой смеси. Дополнительное влияние на уменьшение τ_d оказывает изменение оптических характеристик капли композиционного жидкого топлива при добавлении угольной пыли. Коэффициент поглощения внешнего излучения в данном случае увеличивается. Интенсифицируется радиационный (лучистый) теплообмен на границе «капля – окислитель». Совокупность этих факторов ведет к уменьшению времен задержки зажигания на 20–30 % при $0 < \varphi_c < 10$ % и $0.5 < R_d < 1.5$ мм (рисунок 3.2.3).

Повышение концентрации жидкого горючего компонента в композиционном жидком топливе может приводить как к снижению (для составов на основе кека), так и к росту (для составов на основе угольной пыли) времен задержки зажигания. Чем больше размеры капель, тем сильнее выражается эффект (рисунок 3.2.4). Например, для капель с $R_d \approx 0.5$ мм уменьшение времени задержки зажигания не превышает 15 % при $0 < \varphi_f < 15$ %, а для капель с $R_d \approx 1.5$ мм изменение τ_d может достигать 30 % при идентичных условиях.

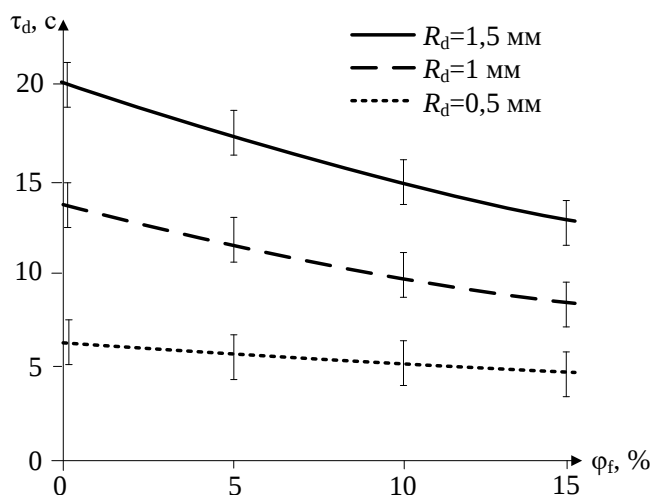


Рисунок 3.2.4. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли отработанного масла в составе композиционного жидкого топлива при различных размерах капель для состава: ((84–99) % Кек каменного угля марки «К», (0–15) % турбинное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $t_g \approx 600$ °С, $V_g \approx 5$ м/с [109]

Рисунок 3.2.5 иллюстрирует масштабы влияния размеров частиц угольной пыли в составе композиционного жидкого топлива на интенсивность процесса зажигания.

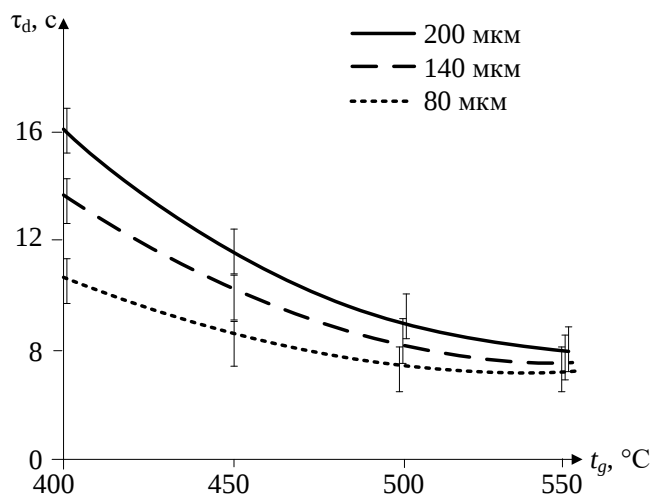


Рисунок 3.2.5. Времена задержки зажигания капли в зависимости от температуры для различных размеров частиц угольной пыли (49 % каменный уголь «К», 45 % вода, 5 % моторное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $R_d \approx 1$ мм и $V_g \approx 5$ м/с [109]

Полученные данные (рисунок 3.2.5) коррелируют с теоретическими следствиями численного исследования [119], где в результате математического моделирования процесса зажигания одиночных частиц угля в условиях конвективного нагрева установлена существенное влияние их размеров на условия и характеристики процесса. Показано [119], что длительность процесса нагрева ($\tau_d \approx 20$ с) относительно больших ($R_d \rightarrow 0.5$ мм) частиц угля существенно превышает времена задержки зажигания ($\tau_d \approx 5$ с) при $R_d \rightarrow 0.05$ мм. Вследствие эндотермичности процесса выхода летучих существенно снижается температура (на 50–150 °C) газовой смеси в окрестности частицы. Большие изменения температуры характерны для относительно крупных частиц угля. С ростом концентрации продуктов термического разложения энерговыделение возрастает в результате ускорения реакции окисления. Это ведет к увеличению температуры на границе «частица – окислитель» и ускорению прогрева глубинных слоев частицы. Устойчивое зажигание происходит при достижении критических значений как температуры, так и концентрации летучих

в среде окислителя. Аналогичные эффекты влияют на времена задержки зажигания составов композиционных жидких топлив, содержащих частицы угля.

Длительность приготовления топливной композиции также может сильно влиять на инерционность процесса зажигания капель композиционного жидкого топлива. При этом на свойства топлива влияет не только время приготовления составов композиционного жидкого топлива, но и тип использованного современного оборудования (кавитаторы или гомогенизаторы). На рисунке 3.2.6 представлены времена задержки зажигания капель композиционного жидкого топлива при изменении длительности процесса приготовления от нескольких минут до нескольких часов.

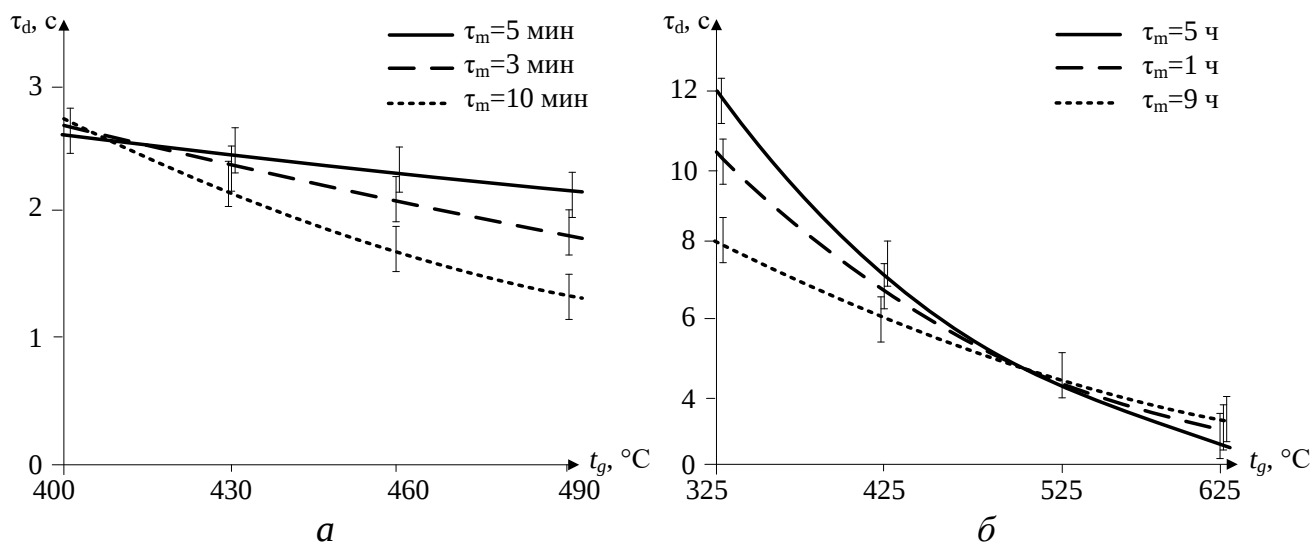


Рисунок 3.2.6. Времена задержки зажигания капли композиционного жидкого топлива в зависимости от температуры при различной длительности приготовления состава [109]: *а* – несколько минут (94% Кек (влажный) каменного угля марки «К», 5% моторное масло отработанное, 1 % пластификатор) и *б* – несколько часов (54% каменный уголь марки «Т», 40 % вода, 5% турбинное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $R_d \approx 1$ мм, $V_g \approx 5$ м/с

На рисунке 3.2.6а показано, что время приготовления состава (длительность работы гомогенизатора) существенно влияет на время задержки зажигания композиционного жидкого топлива, что говорит о необходимости длительного приготав-

ления составов и, следовательно, увеличении затрат на производство за счет электроэнергии. Однако рисунок 3.2.6б показывает, что существует некоторое оптимальное (с точки зрения требуемых ресурсов на топливоприготовление и характеристик процессов зажигания получаемых топливных композиций) время приготовления композиционного жидкого топлива. Из графика становится понятно, что достаточная длительность процесса приготовления составляет не больше 1 часа, если топливо планируется сжигать при высоких ($>900\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах.

На основании рисунков 3.2.2–3.2.6 можно сделать несколько выводов. Во-первых, при изменении концентрации компонентов композиционного жидкого топлива происходит совершенно различное влияние на длительности стадий зажигания. Например, рост концентрации высококачественного обогащенного угля в композиционном жидком топливе приводит к снижению времен задержки зажигания, а также увеличению времени горения и температуры сгорания. Также уменьшаются минимальные температуры окислителя, достаточные для устойчивого инициирования горения топливных композиций. Поэтому при варьировании концентрации компонентов целесообразно выделять основные цели – минимизацию ресурсов при зажигании топливной композиции или повышение тепловых эффектов процесса горения. Во-вторых, определяющими в процессе газофазного горения смеси продуктов испарения жидкого горючего компонента и термического разложения органической части угля, а также гетерогенного горения коксового остатка являются характеристики твердого компонента композиционного жидкого топлива (влажность угля и содержание летучих веществ). Последние параметры определяют скорости прогрева композиций и скорости вдува горючих газообразных компонентов в приповерхностный слой капли композиционного жидкого топлива. Эти параметры играют важнейшую роль при определении скоростей соответствующего химического реагирования (газофазного и гетерогенного). В-третьих, большую часть длительности τ_c составляют значения времени τ_d . Поэтому определяющую роль в процессе сжигания композиционного жидкого топлива играют стадии, предшествующие гетерогенному горению коксового остатка. Для оптимизации процессов сжигания композиционного жидкого топлива в энергетике и других секторах

промышленности целесообразно минимизировать τ_d (в том числе и за счет выбора оптимальных концентраций и характеристик компонентов в составе топливной композиции).

Проведенные эксперименты показали, что уменьшение размера капли (R_d) приводит к росту минимальных температур окислителя (t_g^{lim}), необходимых и достаточных для зажигания композиционного жидкого топлива. Их значения для исследованных составов композиционного жидкого топлива изменялись в диапазоне от 400 до 600 °С. При увеличении R_d возрастает концентрация вдуваемых с поверхности капли в окружающую среду продуктов термического разложения и испарения жидких горючих и негорючих компонентов. В результате, скорость реакции окисления парогазовой смеси возрастает относительно аналогичных значений для капель меньшего размера. Этим можно объяснить тем, что предельные температуры окислителя t_g^{lim} на 80–110 °С ниже при $R_d \approx 1.5$ мм относительно $R_d \approx 0.5$ мм.

При сравнении же времен задержки зажигания и полного сгорания капель композиционного жидкого топлива с разными размерами установлены вполне очевидные закономерности. С ростом размеров капель значения τ_d и τ_c нелинейно увеличивались. Основной причиной, скорее всего, является, как и в случае частиц угольной пыли или водоугольных суспензий усиление роли инертного прогрева. Чем больше размер капли композиционного жидкого топлива, тем больше времени требуется для ее прогрева до достижения условий зажигания. Во всех экспериментах инициирование горения происходило только после практически полного испарения влаги из приповерхностного слоя капли топливной композиции. Поэтому можно сделать вывод о том, что при поиске оптимальных параметров сжигания композиционного жидкого топлива целесообразно установление соответствия между размерами капель, температурами окислителя, а также свойствами и концентрациями основных компонентов. Выделенные особенности зажигания композиционных жидких топлив позволяют сделать заключения о больших перспективах применения таких топлив для эффективной утилизации большой группы твердых и жидких отходов переработки углей и нефти, а также отходов, нефтехимической, энергетической и транспортной отраслей промышленности.

3.3. Условия зажигания органоводоугольного топлива на основе углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин

Выполненные эксперименты позволили установить типичные стадии горения капель рассмотренных составов ОБУТ. Эти стадии хорошо соответствуют современным представлениям о процессах зажигания и горения ВУТ [63]. Однако установлены и специфические особенности. При зажигании ОБУТ реализуются следующие процессы: прогрев приповерхностного слоя капли и испарение влаги (визуально меняется изображение капли с глянцевой на структурно неоднородную); прогрев частиц углеродного остатка и его термическое разложение; формирование в тонком приповерхностном слое смеси паров воды и жидкой горючей компоненты, а также газообразных продуктов термического разложения органической части углеродного остатка (летучих); газофазное зажигание этой смеси; прогрев коксового остатка и его гетерогенное зажигание. Отличием от ВУТ [63] является стадия газофазного зажигания. Для ОБУТ зарегистрированы большие температуры и меньшие длительности этой стадии по сравнению с ВУТ [63]. Это обусловлено интенсивным испарением жидкой горючей компоненты. Тепловые эффекты для этих процессов сопоставимы с выходом летучих и существенно меньше, чем парообразование воды. В случае повышения концентрации жидкой горючей компоненты в составе ОБУТ влияние выделенного эффекта усиливается (сопровождается появлением очага факельного горения) [108].

Термопарные высокоскоростные измерения показали, что на стадии прогрева капли и испарения влаги из приповерхностного слоя температура t_g достаточно монотонно растет. Влияние эндотермических превращений приводило к некоторому замедлению роста t_g , но его монотонность сохранялась (этот результат хорошо согласуется с известными данными для ВУТ [63]). При интенсификации экзотермической реакции окисления летучих и паров жидкой горючей компоненты монотонность роста t_g представляла экспоненциальный участок. Это обусловлено соответствующими нелинейными зависимостями [119] скоростей химического реагирования от температуры в газовой и твердой фазе. После достижения экстремальных значений t_g регистрировалось монотонное снижение, иллюстрирующее выгорание

коксового остатка. В течение нескольких десятков секунд значения t_g выходили на значение, соответствующее температуре окислителя. Эти условия иллюстрировали завершение процесса выгорания коксового остатка и всего горения капли топлива в целом.

На рисунках 3.3.1–3.3.3 приведены времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОВУТ при варьировании определяющих параметров в широких диапазонах, соответствующих типичным топочным устройствам энергетических установок. Можно сделать общие заключения для всех кривых, приведенных на рисунках 3.3.1–3.3.3. Во-первых, диапазоны изменения значения τ_d и τ_c очень широкие (этот эффект иллюстрирует большие возможности оптимизации процессов). Во-вторых, практически все зависимости являются нелинейными (иллюстрация доминирующей роли фазовых превращений и химического реагирования по сравнению с инертным прогревом). В-третьих, большую часть времен полного сгорания составляют τ_d (подчеркивает важность интенсификации начальной стадии для оптимизации всего процесса горения). В-четвертых, изменение концентраций компонентов может с разными масштабами влиять на времена τ_d и τ_c .

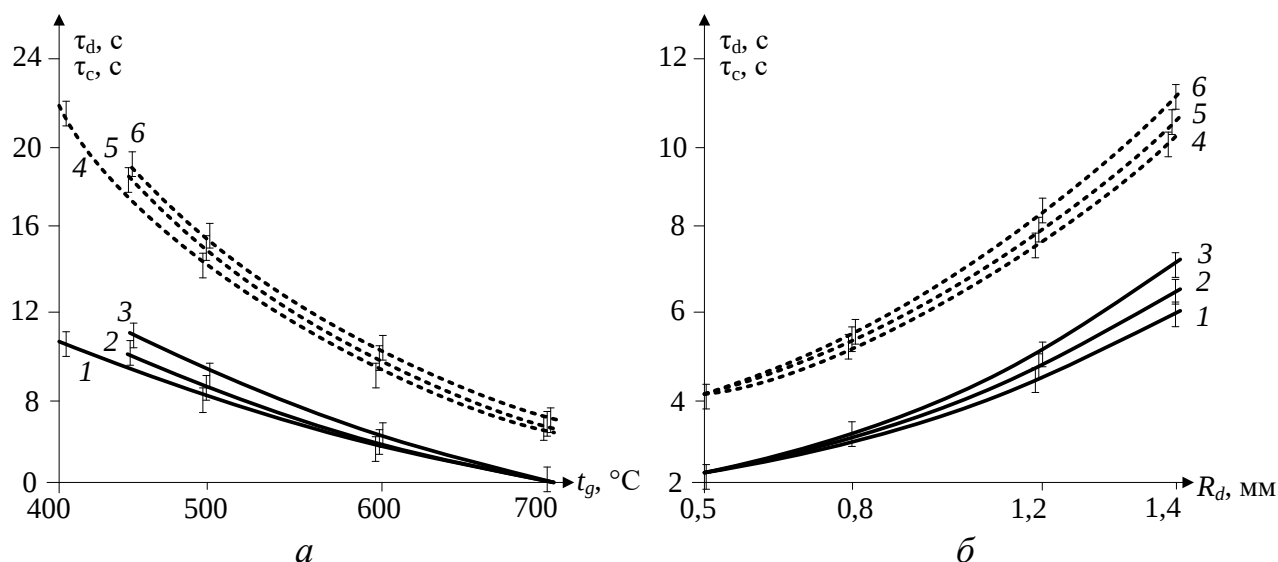


Рисунок 3.3.1. Времена задержки зажигания (сплошные линии) и полного сгорания (пунктирные линии) капель ОВУТ в зависимости от температуры (при $R_d \approx 1$ мм и $V_g \approx 3,5$ м/с) окислителя (а) и размеров (при $t_g \approx 900$ °С и $V_g \approx 3,5$ м/с) капель (б) для составов на основе отработанного масла [109]: 1, 4 – моторного; 2, 5 – турбинного; 3, 6 – трансформаторного

Выполненные эксперименты показали, что минимальными температурами воздуха, достаточными для устойчивого зажигания рассмотренных составов ОВУТ, являются значения 400–470 °С. При этом выявлена важная особенность – предельные температуры ниже в случае крупных капель (например, разница для капель с размерами 0,5 мм и 1,5 мм может достигать 50–60 °С). Этот неочевидный результат обусловлен существенным влиянием концентрации горючих компонентов (продуктов термического разложения и паров горючей жидкости) на условия газофазного зажигания и прогрева коксового остатка.

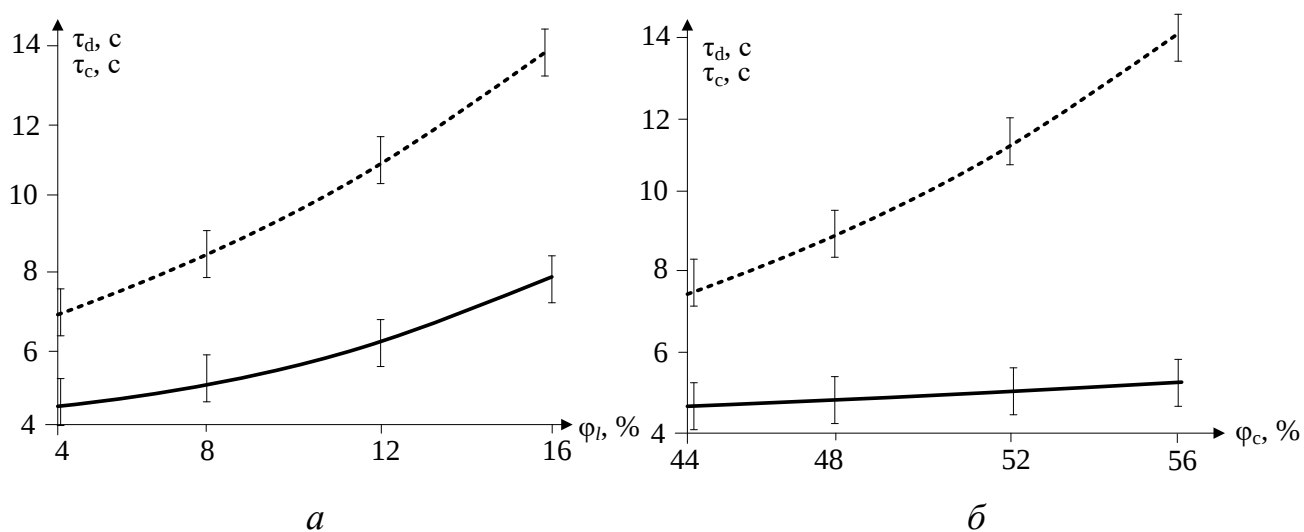


Рисунок 3.3.2. Время задержки зажигания (сплошная линия) и полного сгорания (пунктирная линия) капель ОВУТ при $R_d \approx 1$ мм, $V_g \approx 3,5$ м/с, $t_g \approx 900$ °С в зависимости [109]: от массовой доли отработанного моторного масла (а) и от массовой доли углеродного остатка (б)

Рисунок 3.3.2 иллюстрирует масштабы влияния определяющих компонентов на характеристики зажигания. Видно, что рост концентрации жидкой горючей компоненты на примере отработанного моторного машинного масла может приводить к повышению инерционности процесса горения. В случае турбинного масла зарегистрирован обратный эффект. Эти особенности обусловлены соответствующим влиянием температур воспламенения и теплоты испарения горючих жидкостей. В

случае минимальных значений этих параметров скорости парообразования жидкого горючего компонента превышают скорости термического разложения угля. Это приводит к более интенсивному росту концентрации горючих компонентов в газовой фазе и интенсификации (в соответствии с законом Аррениуса) реакции окисления. Как следствие, времена τ_d и τ_c снижаются. При высоких температурах воспламенения и тепловых эффектах парообразования горючих жидкостей для достижения необходимых концентраций в газовой фазе требуется больше энергии (следовательно, и инерционность процесса растет). Тем не менее, для всех исследованных диапазонов изменения концентраций жидких горючих компонентов регистрировалось устойчивое зажигание и последующее сгорание капли топлива. Этот результат очень важен для обеспечения возможности варьирования сырьевой базы ОВУТ в широких диапазонах с сохранением единой технологии сжигания.

Выделенное на рисунке 3.3.2б увеличение времен полного сгорания капель ОВУТ при повышении относительной массовой концентрации углеродного остатка достаточно очевидно и обусловлено ростом доли органической части в капле топливной композиции. Этот результат хорошо согласуется с известными заключениями для ВУТ [63]. При рассмотрении же параметра τ_d можно сделать вывод о довольно умеренном влиянии концентрации углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин. Этот результат обусловлен, скорее всего, тем, что определяющую роль в процессе зажигания играют концентрации горючих компонентов, вдуваемых с поверхности капли. Соответствующие температуры и тепловые эффекты термического разложения и испарения жидкой горючей компоненты в целом сопоставимы. Как следствие, их вклад на стадии зажигания сложно считать существенно отличающимся. Поэтому рост концентрации углерода приводил лишь к незначительному повышению времен τ_d .

Следует отметить важную закономерность исследованных процессов зажигания ОВУТ. Условия устойчивого зажигания могут реализовываться не только при высоких температурах окислителя, соответствующих топочным устройствам энергетических установок (так принято считать для ВУТ [63]) но и при низкотем-

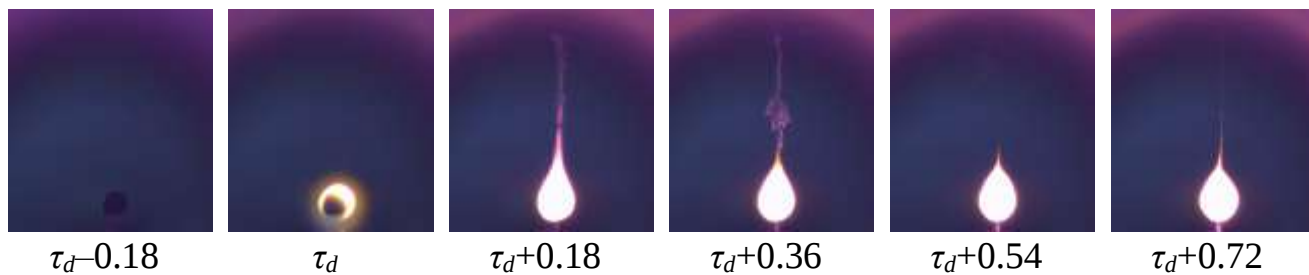
пературном горении твердых топлив [119]. Поэтому возможно существенное расширение областей использования технологий приготовления и сжигания ОБУТ не только на энергетических объектах, но в транспортном секторе (в качестве замены традиционных жидких топливных композиций), а также на химических и нефтехимических производствах.

3.4. Анализ влияния типичных твердых коммунальных отходов в составе композиционного топлива на время задержки зажигания

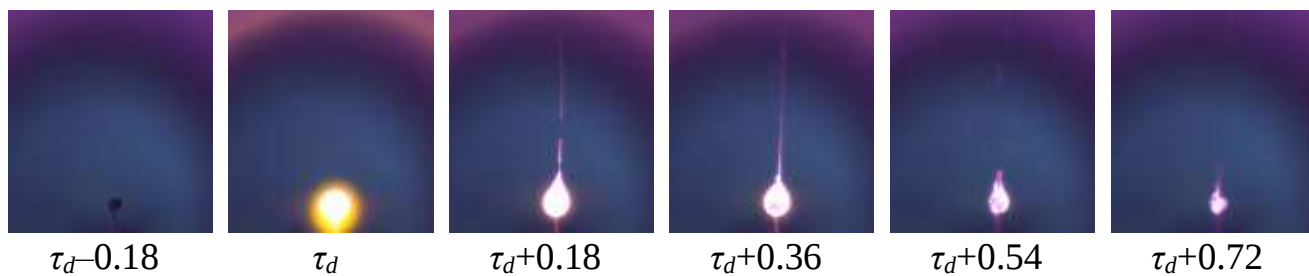
Установлено, что закономерности исследуемых процессов для четырех составов композиционного топлива с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 10% (№ 2–5) аналогичны закономерностям процессов зажигания и горения исходного фильтр-кека (№ 1). Это объясняется тем, что фильтр кек играет основную роль в закономерностях протекания зажигания. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО). После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Далее происходит прогрев твердого остатка, его гетерогенное зажигание и горение [133-136].

На кадрах видеозаписи исследуемых процессов видно (рисунок 3.4.1), что в момент газофазного зажигания τ_d горючая газовая смесь, формирующаяся в окрестности капли, имеет сферическую форму и размер этой смеси эквивалентен 2–3 размерам капли топлива. Полученный результат объясняется отсутствием интенсивного движения воздуха в окрестности капли. После зажигания процесс газофазного горения летучих протекает преимущественно над каплей, где их концентрация максимальна вследствие термогравитационной конвекции. Твердый горючий остаток прогревается за счет энергии, выделяющейся в процессе выгорания газовой смеси, и зажигается. Фронт горения распространяется внутри капли от ее поверхности до центра.

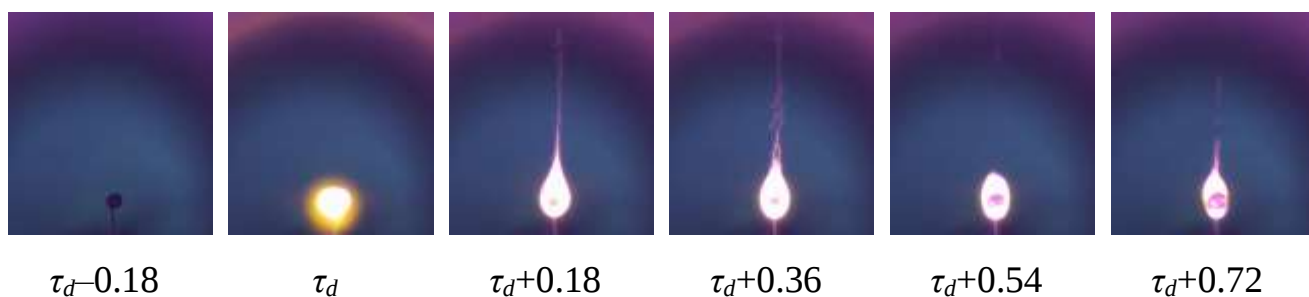
состав № 1 – фильтр-кек 100%



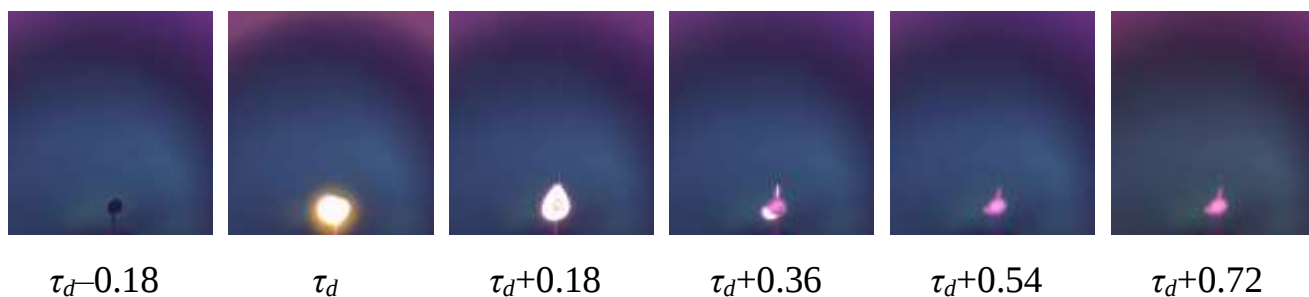
состав № 2 – фильтр-кек 90%, древесина 10%



состав № 3 – фильтр-кек 90%, пищевой отход (картофельные очистки) 10%



состав № 4 – фильтр-кек 90%, пластик 10%



состав № 5 – фильтр-кек 90%, картон 10%

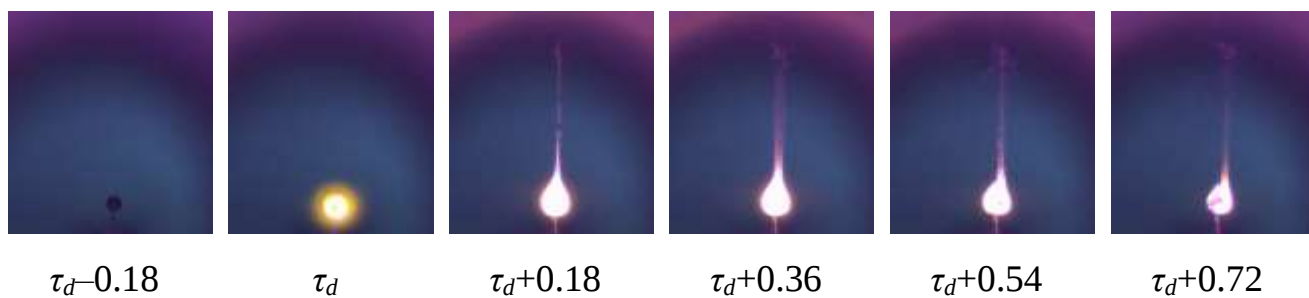


Рисунок 3.4.1. Кадры видеозаписи процессов зажигания и горения капель композиционного жидкого топлива при $t_g \approx 800$ °C [100]

На рисунке 3.4.2 приведена область (заштрихована), иллюстрирующая основную характеристику процесса (τ_d) в условиях гарантированного зажигания разных составов композиционного топлива при варьировании температуры в широком диапазоне $t_g=600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$. Верхней границей области (рисунок 3.4.2) является кривая, характеризующая времена задержки зажигания исходного фильтр-кека (без добавления ТКО) от температуры. Нижней границей области (рисунок 3.4.2) является кривая $\tau_d=f(t_g)$, полученная для топливного состава на основе фильтр-кека и картона. Времена задержки зажигания остальных составов расположены в пределах выделенной области (рисунок 3.4.2). Полученный результат (рисунок 3.4.2) позволяет сделать вывод о том, что температура окружающей среды $600\text{ }^\circ\text{C}$ является минимальной, необходимой для инициирования процесса горения композиционного топлива на основе отходов углеобогащения и твердых коммунальных отходов.

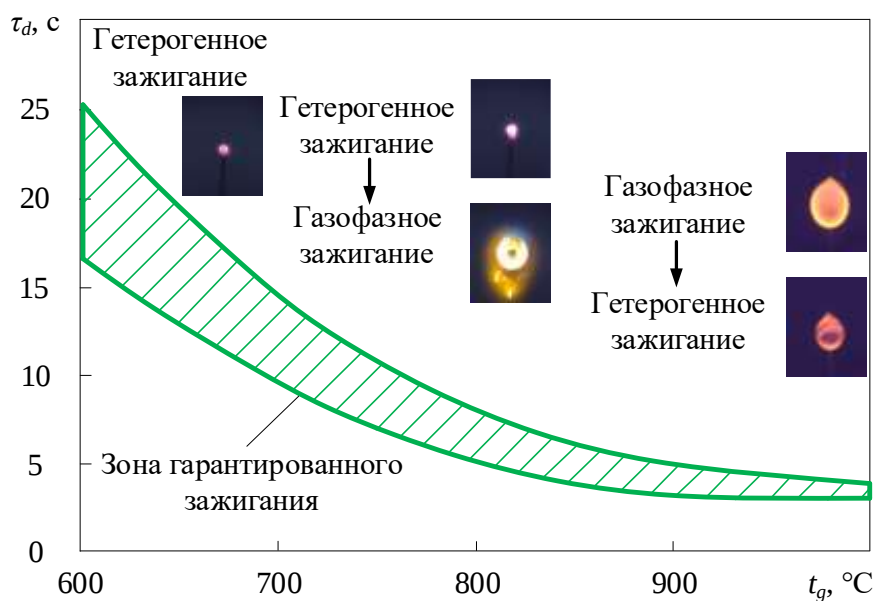


Рисунок 3.4.2. Область (заштрихована) времен задержки зажигания разных составов композиционного топлива с ТКО в широком диапазоне варьирования температуры окружающей среды [100]

Максимальное отличие τ_d для составов с разными компонентами составляет менее 25% в области относительно невысоких температур ($600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$). При температурах окружающей среды более $900\text{ }^\circ\text{C}$ отличие τ_d для разных составов топлива

не превышает 5–10%. Также установлено, что при температурах воздуха более 1000 °С интенсивность инициирования горения топлива высока, процессы тепло-массопереноса оказывают менее существенное влияние на характеристики зажигания, чем при температурах $t_g=600\text{--}1000$ °С. В условиях лучистого нагрева при $t_g>1000$ °С времена задержки зажигания для одного и того же состава топлива отличаются несущественно. Например, при $t_g\approx 1100$ °С и $t_g\approx 1200$ °С отличие τ_d составляет менее 5%.

Анализ высокоскоростных видеозаписей процессов зажигания и горения композиционных топлив в условиях низкой ($t_g=600\text{--}700$ °С), умеренной ($t_g=700\text{--}800$ °С) и высокой ($t_g>800$ °С) интенсивности нагрева капель позволил установить закономерности протекания физико-химических процессов, которые могут быть использованы при разработке математической модели. При относительно невысоких температурах длительность индукционного периода достаточно высока 15–20 с (рисунок 3.4.2). В таких условиях интенсивность протекания термического разложения горючих компонентов невелика. Вследствие диффузионно-конвективного тепло-массопереноса в окрестности капли топлива концентрация горючих газов недостаточна для инициирования процесса горения. Поэтому гетерогенное зажигание и последующее горение с относительно невысокой интенсивностью характерны для температуры $t_g=600\text{--}700$ °С. Аналогичная закономерность характерна для более высоких температур окружающей среды. Однако при температурах $t_g=700\text{--}800$ °С гетерогенное горение протекает более интенсивно ($\tau_d=5\text{--}10$ с) по сравнению с областью меньших температур окружающего воздуха. Это ведет к росту скорости термического разложения горючих компонентов и достижению концентраций летучих в окрестности капли, необходимой для газофазного зажигания. Разница между временами гетерогенного и газофазного зажигания не превышает 0.5 с. В области высоких температур интенсивности прогрева приповерхностного слоя капли, термического разложения горючих компонентов и формирования газовой смеси высоки (рисунок 3.4.2). В таких условиях ранее описанную закономерность физико-химических процессов иллюстрирует рисунок 3.4.1.

Полученные результаты (рисунки 3.4.1, 3.4.2) показывают, что эффективная

утилизация твердых коммунальных отходов возможна на объектах промышленной теплоэнергетики (в первую очередь, котельных установках большой и малой энергетики), а добавление твердых коммунальных отходов в состав КЖТ снижает энергетические характеристики технологического процесса (в частности, теплоту сгорания, как показано в таблице 2.1).

3.5. Анализ влияния механизма подвода тепла на характеристики зажигания и горения композиционного топлива с добавлением твердых коммунальных отходов

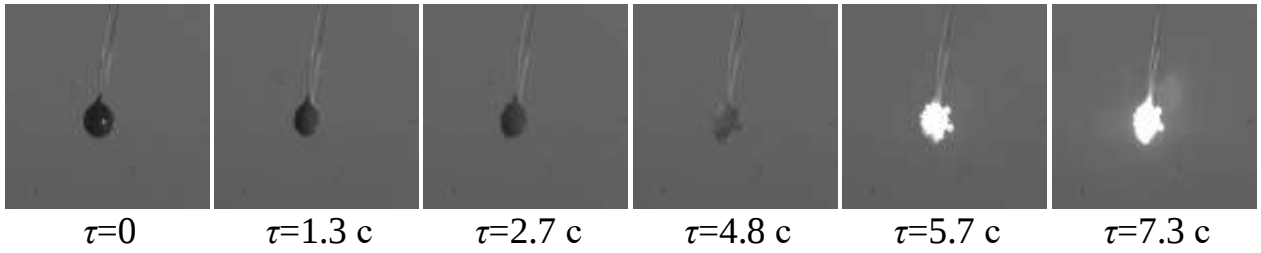
На рисунке 3.5.1 приведены кадры видеозаписи, иллюстрирующие протекание процессов зажигания и горения капель композитных жидких топлив в потоке разогретого воздуха. Установлено, что закономерности исследуемых процессов для четырех составов (№ 2–5) топлива с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 10% аналогичны закономерностям процессов зажигания и горения исходного кека в виде ВУТ (№ 1). Полученный результат объясняется определяющим влиянием этого компонента на закономерности протекания физико-химических процессов при нагревании суспензионного топлива. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО). После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Заканчивается все прогревом твердого остатка, его гетерогенным зажиганием и горением [103].

Отличие исследуемых процессов для составов № 1–5 (рисунок 3.5.1) заключается в разной длительности стадий. Для состава № 5 (кек 90%, картон 10%) характерны минимальные времена задержки зажигания по сравнению с другими составами при идентичных условиях нагрева. Полученный результат объясняется меньшим содержанием влаги в составе топлива при добавлении твердых коммунальных отходов по сравнению с составом № 1 (кек без добавления дополнительных горючих компонентов). В таких условиях затрачивается меньше энергии и времени на

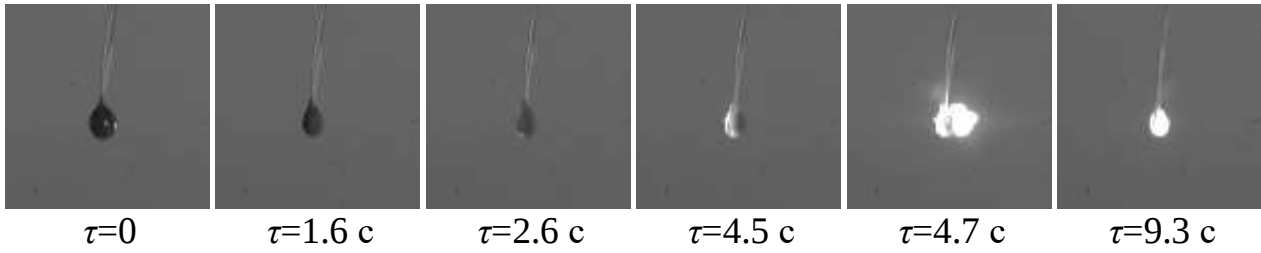
прогрев приповерхностного слоя капли, испарение влаги и инициирование горения. Также добавление типичных коммунальных отходов в кек ведет к появлению явно выраженной стадии пламенного горения в окрестности капли. Это связано с тем, что для большинства типичных коммунальных отходов характерен газофазный режим горения. В результате их нагрева происходит термическое разложение, газообразные продукты реагируют с окислителем.

Протекание процесса горения капли топлива в условиях конвективного нагрева определяется особенностями ее обтекания потоком разогретого воздуха. Процессы интенсивного прогрева капли и испарения влаги происходят на фронтальной (по отношению к набегающему потоку воздуха) стороне. Эти процессы менее интенсивно протекают на тыльной стороне капли в области меньших скоростей потока воздуха. Локальная зона гетерогенного зажигания капли формируется со стороны набегающего потока воздуха (рисунок 3.5.1). После этого интенсифицируется процесс термического разложения компонентов топлива. Газообразные продукты термического разложения горючего смешиваются с воздухом в окрестности капли. Кадры со стадией пламенного горения (рисунок 3.5.1) иллюстрируют, что отрыв набегающего потока воздуха происходит в окрестности экватора капли (по направлению движения потока воздуха). При этом за каплей (по направлению движения потока воздуха) формируются вихри. В этой области линейная скорость газового потока существенно меньше скорости набегающего на каплю потока воздуха, а концентрация горючих газов максимальна. Поэтому пламенное горение газовой смеси протекает именно в этой области. Параллельно с процессом газофазного горения развивается гетерогенное горение (рисунок 3.5.1). Фронт гетерогенного горения распространяется по поверхности капли в направлении движения потока воздуха.

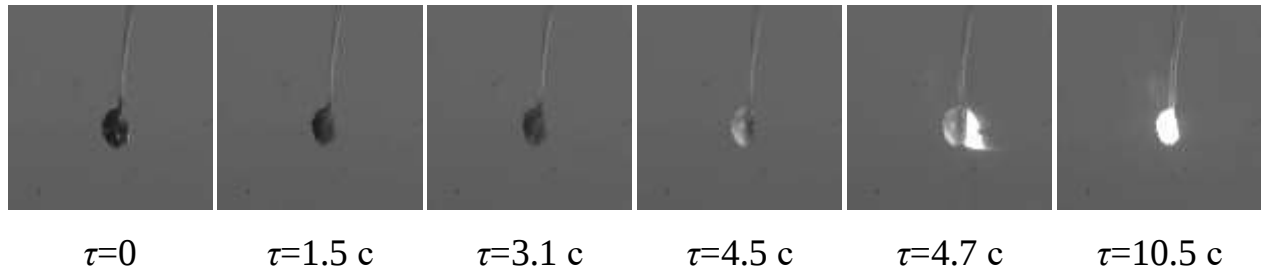
топливо № 1 (кек 100%)



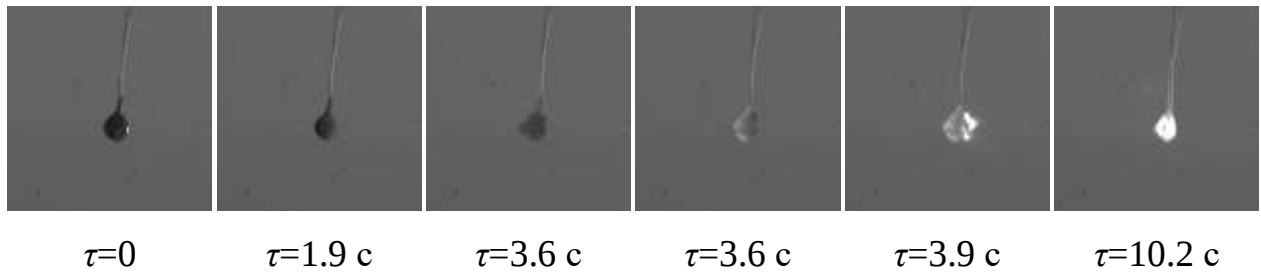
топливо № 2 (кек 90%, древесина 10%)



топливо № 3 (кек 90%, резина 10%)



топливо № 4 (кек 90%, пластик 10%)



топливо № 5 (кек 90%, картон 10%)

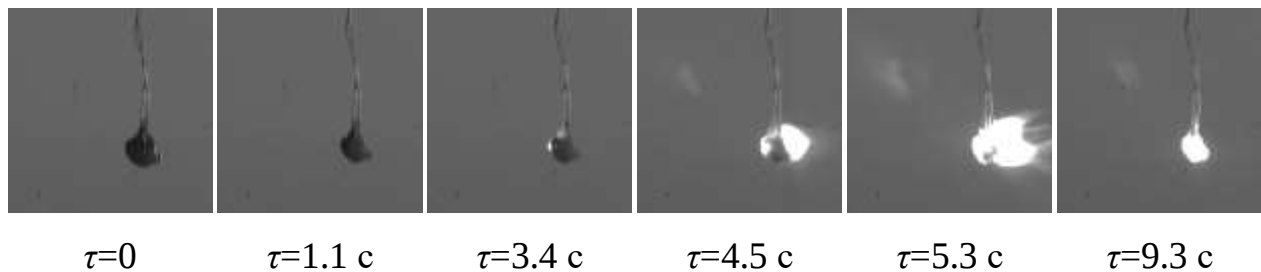


Рисунок 3.5.1. Кадры видеозаписей процессов зажигания и горения капель композитного жидкого топлива в условиях конвективного нагрева в потоке разогретого воздуха при $t_g \approx 600$ °C [103]

топливо № 5 (кек 90%, картон 10%)

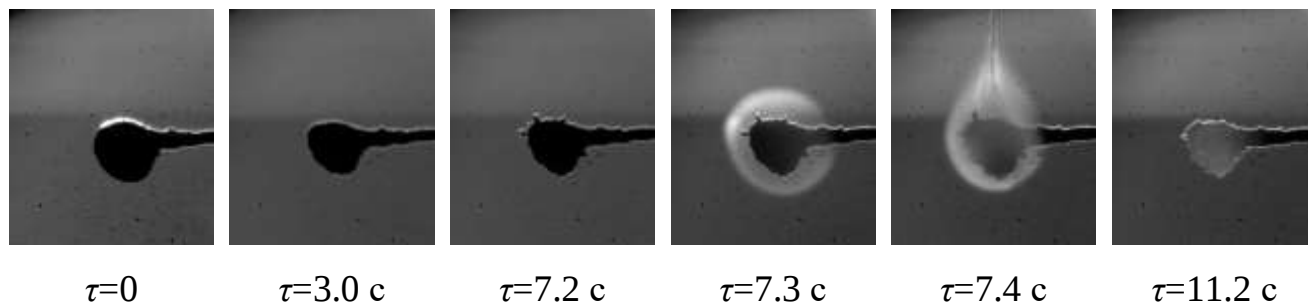


Рисунок 3.5.2. Кадры видеозаписи процесса зажигания капли композитного жидкого топлива в условиях лучистого нагрева при $t_g \approx 600$ °C [103]

Установлено, что в результате испарения влаги из приповерхностного слоя капли структура ее поверхности становится пористой и шероховатой (рисунок 3.5.1). В этом случае отдельный выступ (элемент шероховатости) на поверхности со стороны набегающего потока воздуха является зоной локального зажигания топлива. Длительность прогрева таких выступов намного меньше, чем формирование локальной зоны зажигания у капли с гладкой поверхностью. Полученный результат обоснован тем, что для капель с практически гладкой поверхностью в отличие от капель с шероховатой и пористой поверхностью (образуется при обезвоживании приповерхностных слоев) характерен прогрев капли ближе к центру, что ведет к увеличению продолжительности стадии инертного прогрева.

В условиях лучистого нагрева капли топлива закономерности физико-химических процессов (рисунок 3.5.2) аналогичны закономерностям, установленным в условиях конвективного нагрева (рисунок 3.5.1). Однако достаточно существенным отличием является большая длительность инертного прогрева капли топлива и формирование зоны зажигания и горения продуктов термического разложения в среде окислителя над каплей. Полученный результат объясняется отсутствием интенсивного движения воздуха в окрестности капли. Из-за ее равномерного прогрева скорость термического разложения горючих компонентов идентична вдоль всей поверхности капли. Если на поверхности капли условно выделить секторы малого размера, то количество горючих газов, поступающих из каждого такого сек-

тора в окружающую среду, будет идентично. Поэтому газофазное зажигание продуктов термического разложения происходит равномерно в окрестности капли. Далее процесс горения протекает преимущественно над каплей, где концентрация горючих газов максимальна вследствие термогравитационной конвекции. Также условия лучистого теплообмена являются причиной более равномерного прогрева твердого горючего остатка по сравнению с условиями конвективного нагрева. Как следствие в такой системе происходит практически равномерное гетерогенное зажигание твердого остатка термического разложения без явно выраженной зоны локального зажигания.

Условия лучистого нагрева капли топлива, реализуемые с помощью экспериментального стенда № 1, позволили установить масштаб влияния добавления типичных твердых коммунальных отходов в состав кека на основную характеристику процесса – время задержки зажигания. На рисунке 3.5.3а приведены зависимости времен задержки зажигания для топлив № 1–5 в широком диапазоне варьирования температуры t_g (450–1000 °C).

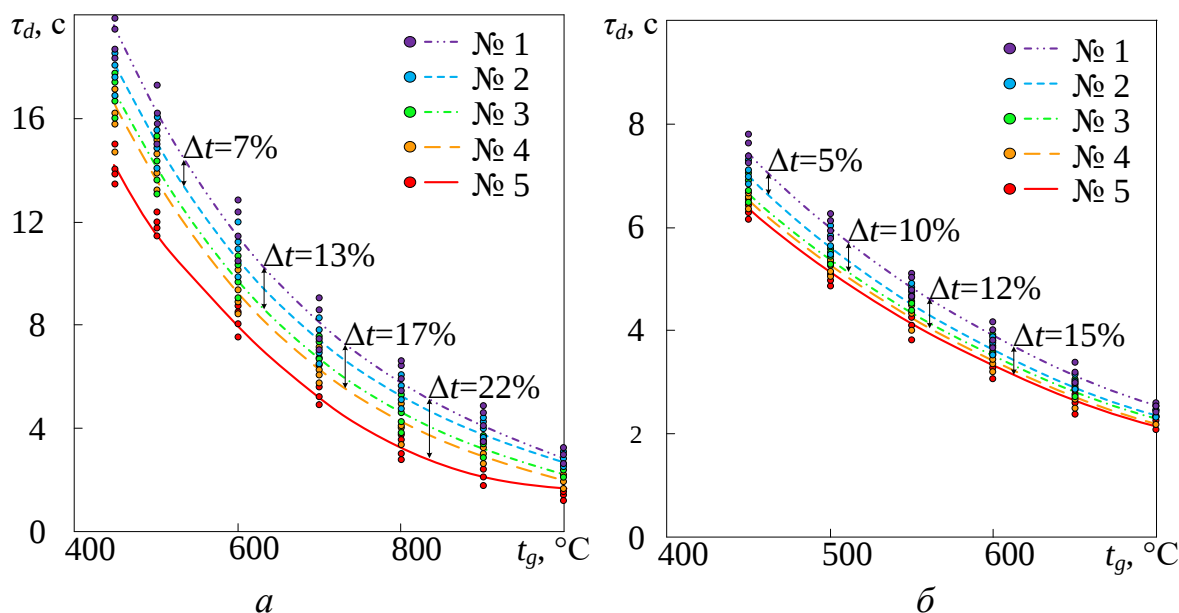


Рисунок 3.5.3. Зависимости времени задержки зажигания топлива от температуры воздуха [103]: а – в условиях лучистого нагрева (стенд № 1); б – в условиях конвективного нагрева (стенд № 2); № 1 – кек 100 %; № 2 – кек 90 %, древесина 10 %; № 3 – кек 90 %, резина 10 %; № 4 – кек 90 %, пластик 10 %; № 5 – кек 90 %, картон 10 %

Установлено, что для устойчивого зажигания топлив на основе кека с добавлением мелкодисперсных твердых коммунальных отходов необходима температура воздуха не менее 450 °С. Температура, достаточная для зажигания отдельных компонентов, например, картона, древесины, резины существенно ниже 450 °С (таблица 2.2). Но вклад этих компонентов не является определяющим для предельных значений температуры и тепловых потоков, необходимых для зажигания суспензионного топлива, т.к. значительную роль играет влага. Добавление разных компонентов влияет на интенсификацию процесса зажигания. На рисунке 3.5.3а показаны отличия времен задержки зажигания. Длительность индукционного периода для составов с добавлением твердых коммунальных отходов меньше t_d кека без добавок. При добавлении древесины в состав кека времена задержки зажигания уменьшаются на 7%, при добавлении резины – на 13%, пластика – на 17%, картона – на 22%. Полученный результат свидетельствует о возможности оптимизации на практике режимов работы теплогенерирующего оборудования при добавлении разных твердых горючих компонентов в состав топлива, а также при варьировании их концентрации.

Кроме того, из рисунка 3.5.3 видно, что при температуре около 1000 °С времена задержки зажигания отличаются менее 5%. Это объясняется существенно меньшим влиянием тепломассопереноса в процессе горения по сравнению с более низкими температурами.

На рисунке 3.5.3б представлены результаты исследования процессов зажигания капель композитного жидкого топлива в условиях конвективного нагрева, полученные с помощью экспериментального стенда № 2. Приведены зависимости времен задержки зажигания для топлив № 1–5 при варьировании температуры потока воздуха t_g в диапазоне 450–700 °С. Установлено, что в условиях конвективного нагрева капель топлива температура потока разогретого воздуха 450 °С является минимальной, необходимой для устойчивого зажигания составов композитного жидкого топлива на основе кека с добавлением твердых коммунальных отходов.

Полученные результаты (рисунок 3.5.3) показывают, что независимо от меха-

низма (конвективного или лучистого) нагрева капли КЖТ температура 450 °С является предельной, необходимой для инициирования процесса горения. Такие температуры можно обеспечить в действующих котельных установках большой и малой энергетики. Также анализ полученных результатов (рисунок 3.5.3) позволяет сделать вывод о том, что в условиях более интенсивного теплообмена с окружающей средой при идентичной температуре воздуха времена задержки зажигания отличаются в 2–3 раза. Наряду с этим по сравнению с результатами (рисунок 3.5.3а) максимальное отличие τ_d для составов с разными компонентами составляет менее 15% (рисунок 3.5.3б).

3.6. Анализ влияния отработанного масла в составе композиционного топлива на характеристики зажигания

Рассмотренные в диссертационной работе составы композиционных топлив условно можно разделить на 3 группы: I – фильтр-кек 90%, ТКО 10% (состав ТКО в таблице 3.6.1); II – фильтр-кек 80%, ТКО 20%; III – фильтр-кек 70%, ТКО 20%, масло 10% [159]. На рисунке 3.6.1 показаны кадры зажигания и горения капель КЖТ с различными составами

Установлено, что для указанных составов (с добавлением ТКО и масла и без их добавки) характерна идентичная совокупность процессов, протекающих в течение индукционного периода. Ни изменение концентрации горючих твердых коммунальных отходов в диапазоне 10–20%, ни добавление горючей жидкости в количестве до 10% не ведут к изменению механизма зажигания КЖТ. Анализ высокоскоростных видеозаписей позволил выделить следующие основные стадии процесса взаимодействия одиночной капли композиционного жидкого топлива с неподвижным разогретым воздухом. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО). После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Заканчивается все прогревом твердого остатка, его гетерогенным зажиганием и горением. Полученный результат объясняется определяющим влиянием мелкодисперсного

твёрдого горючего компонента (фильтр-кека) в составе топливной смеси на закономерности протекания физико-химических процессов при нагревании топлива (таблица 3.6.1).

Таблица 3.6.1. Составы композиционных жидких топлив и теплота сгорания [159]

№.	Кек*	масло	древесина	резина	пластик	картон	$Q (\times 10^6 \text{ Дж/кг})$
1	100%	—	—	—	—	—	10.78
2	90%	—	10%	—	—	—	11.29
3	90%	—	—	10%	—	—	13.05
4	90%	—	—	—	10%	—	11.88
5	90%	—	—	—	—	10%	11.43
6	80%	—	20%	—	—	—	11.80
7	80%	—	—	20%	—	—	15.31
8	80%	—	—	—	20%	—	12.98
9	80%	—	—	—	—	20%	12.07
10	90%	10%	—	—	—	—	14.11
11	70%	10%	20%	—	—	—	15.12
12	70%	10%	—	20%	—	—	18.64
13	70%	10%	—	—	20%	—	16.30
14	70%	10%	—	—	—	20%	15.40

* — влажность 50%

На кадрах видеозаписей исследуемых процессов видно (рисунок 3.6.1), что в момент газофазного зажигания горючая газовая смесь, формирующаяся в окрестности капли топлива, имеет сферическую форму. Размер этой зоны эквивалентен 2–3 размерам капли топлива. Размер формирующейся зоны горючих газов (до момента зажигания) в окрестности капли тем больше, чем больше компонентов с высоким содержанием летучих входит в состав топлива и чем меньше температура окружающей среды. В последнем случае (при близких к предельным условиям зажигания) наиболее явно выражено отличие исследуемых процессов как для трех групп составов с разной концентрацией компонентов, так и для составов в рамках

одной группы с разными компонентами из числа твердых коммунальных отходов. Установленное отличие состоит в разной длительности протекания отдельных стадий процесса и их совокупности в целом (рисунок 3.6.2).

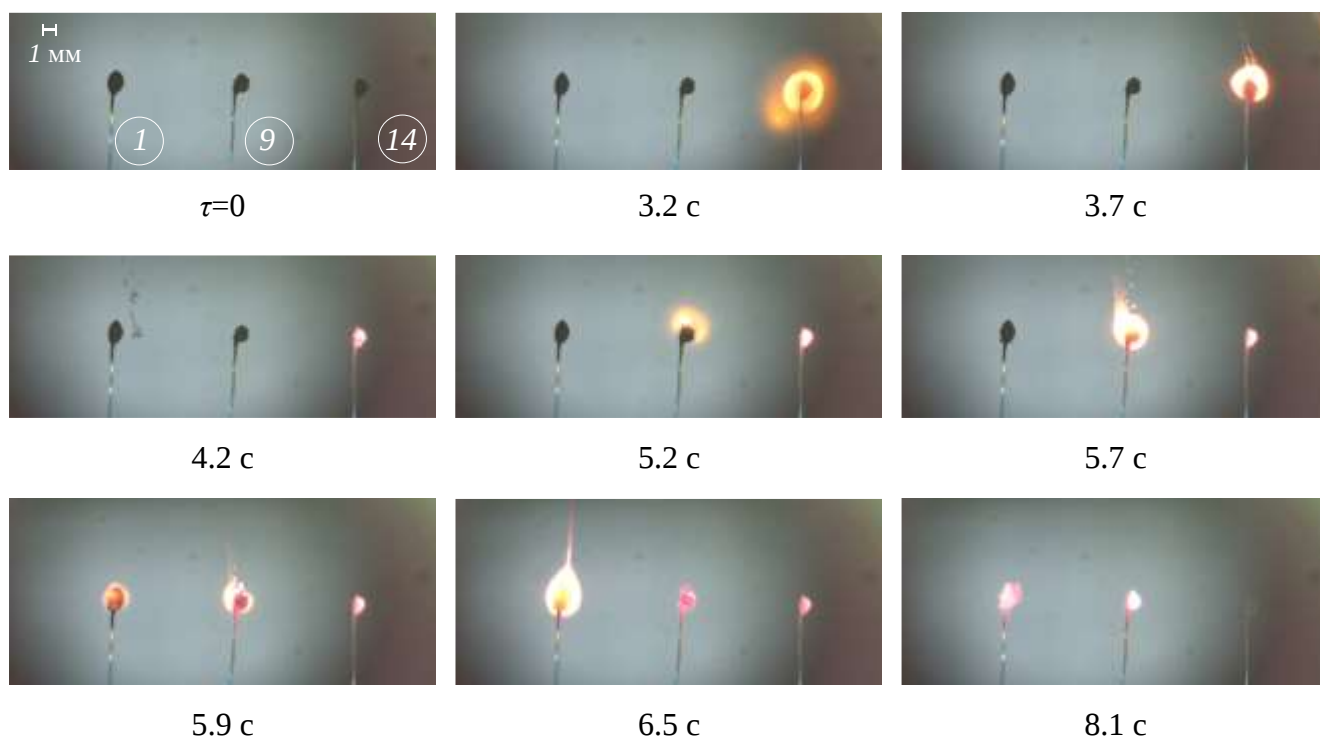


Рисунок 3.6.1. Кадры видеозаписей зажигания и горения капель диаметром 2 мм разных составов композиционного жидкого топлива при $t_g \approx 800^\circ\text{C}$ [159]

На рисунке 3.6.2 показаны три области (выделены разным цветом), иллюстрирующие диапазоны изменения основной характеристики процесса – времени задержки зажигания (τ_d) при варьировании температуры воздуха $t_g = 600\text{--}1000^\circ\text{C}$, когда происходит гарантированное зажигание всех рассмотренных составов композиционного жидкого топлива. Кривая, ограничивающая сверху синюю область (I группа топливных составов), соответствует временам задержки зажигания состава №1. Кривая, ограничивающая снизу красную область (III группа топливных составов), соответствует временам задержки зажигания состава № 14. Значения τ_d остальных рассмотренных составов расположены в промежутке между этими двумя кривыми.

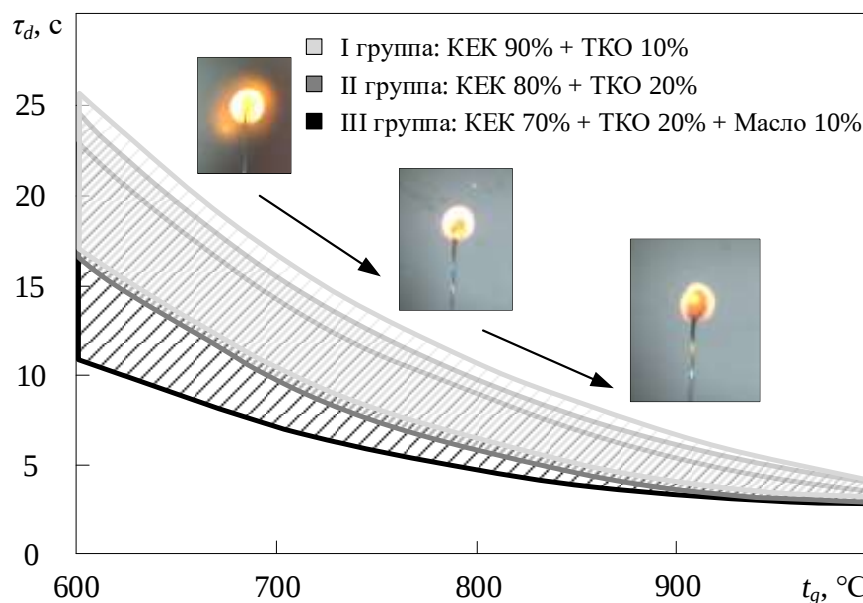


Рисунок 3.6.2. Области (выделены цветом) времен задержки зажигания для трех групп составов композиционного жидкого топлива [159]

Полученные результаты (рисунок 3.6.2) показывают, что температура окружающей среды $t_g \approx 600^\circ\text{C}$ является минимальной, необходимой для инициирования процесса горения композиционного топлива на основе отходов углеобогащения, ТКО и горючей жидкости. Максимальное отличие τ_d для трех групп составов не превышает 25% при температурах воздуха 600–1000 $^\circ\text{C}$. Также установлено, что при $t_g > 1000^\circ\text{C}$, настолько высока интенсивность физико-химических процессов, что тепломассоперенос в капле и ее окрестности оказывает менее существенное влияние на характеристики зажигания, чем при температурах 600–1000 $^\circ\text{C}$. При $t_g > 1000^\circ\text{C}$ времена задержки зажигания для разных топливных составов отличаются несущественно (менее 5%).

Установлено, что значения τ_d для рассмотренных топливных составов убывают в следующей последовательности (при прочих равных условиях): I группа – кек 90%, ТКО 10%; II группа – кек 80%, ТКО 20%; III группа – кек 70%, ТКО 20%, масло 10%. То есть для последних составов характерны меньшие времена задержки зажигания. Наибольшие значения τ_d характерны для кека в исходном влажном состоянии (состав № 1 без добавления каких-либо твердых или жидких горючих компонентов). Добавление в композиционное топливо типичных ТКО в количестве

10%, увеличение их концентрации до 20%, а также добавление отработанного турбинного масла до 10% существенно уменьшает длительность прогрева капли топлива до момента газофазного зажигания (рисунок 3.6.2) при прочих равных условиях. Полученный результат объясняется меньшим содержанием влаги (химически инертный компонент) в составах композиционного топлива при добавлении ТКО по сравнению с составом № 1, а также содержанием более химически активного при нагревании компонента (горючей жидкости). В таких условиях затрачивается меньше энергии и времени на прогрев приповерхностного слоя капли, испарение влаги (эндотермический эффект около 2 МДж/кг) и инициирование горения. Также добавление типичных коммунальных отходов в кек ведет к появлению явно выраженной стадии газофазного горения в окрестности капли из-за относительно высокого содержания летучих компонентов в ТКО.

Кроме установленного отличия времен задержки зажигания для разных составов композиционного топлива характерно отличие температур горения. Этот параметр имеет важное значение как для анализа энергетических, так и экологических характеристик процесса горения топлива. На рисунке 3.6.3 приведены кривые, иллюстрирующие изменение температуры в процессе горения разных составов композиционного жидкого топлива при $t_g \approx 800$ °С. Сплошные кривые иллюстрируют температуру в центре капли (t_1), штриховые кривые – в малой окрестности капли (t_2), где происходит выгорание газовой смеси, формирующейся при испарении жидкого горючего компонента топлива (при наличии) и при термическом разложении твердых компонентов (кек и ТКО). Расстояние между термопарами t_1 и t_2 соответствует начальному диаметру (2 мм) капли топлива.

Для анализа отличий сплошных и штриховых кривых на рисунке 3.6.3 в правом нижнем углу приведена схема расположения термопар при регистрации температур t_1 и t_2 в течение индукционного периода. В соответствии с установленной закономерностью протекания физико-химических процессов сначала происходит газофазное зажигание продуктов испарения и термического разложения компонентов топлива в малой окрестности капли. На рисунке 3.6.3 момент газофазного за-

жигания (τ_d) соответствует точке пересечения соответствующих штриховых кривых с линией $t_g \approx 800$ °С. Это означает, что в результате прогрева горючей газовой смеси в окрестности капли топлива интенсивность экзотермического реагирования возрастает. В результате термохимического саморазогрева температура газовой смеси превышает температуру воздуха, что свидетельствует о газофазном зажигании. Максимальные значения температур t_2 достигают 1300 °С для III группы исследованных топливных составов с добавлением отработанного масла. При сжигании твердых коммунальных отходов при температурах 1300 °С и менее все опасные газообразные вещества разлагаются на простейшие, что исключает присутствие в составе дымовых газов вредных выбросов типа диоксинов или фуранов. Дополнительное введение карбамида в топку котла и смеси реагентов (активированного угля со щелочным сорбентом $\text{Ca}(\text{OH})_2$) в мокро-сухой адсорбер снижает концентрацию вредных веществ в дымовых газах. Их дополнительная очистка происходит в фильтре до значений, соответствующим нормативным показателям.

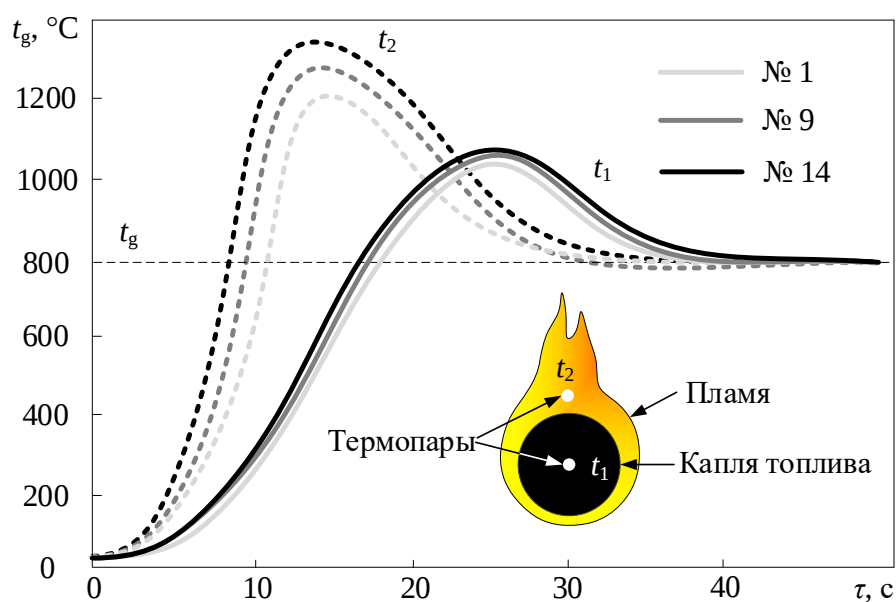


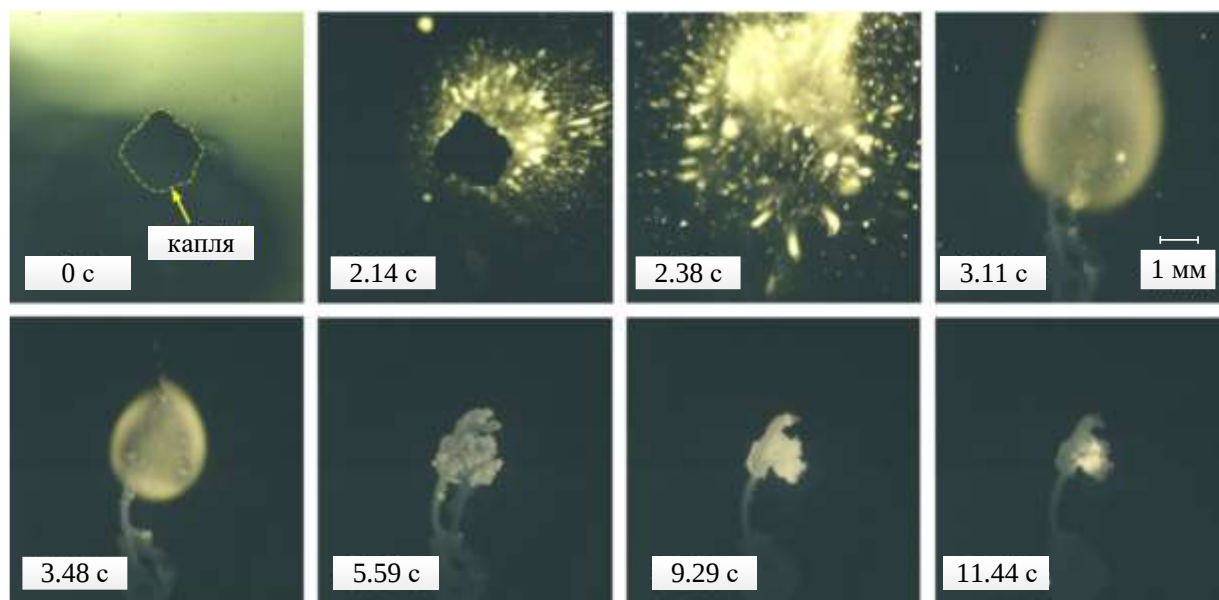
Рисунок 3.6.3. Изменение температуры капель начальным диаметром 2 мм разных составов композиционного жидкого топлива в течение индукционного периода при $t_g \approx 800$ °С [159]

За счет достаточно интенсивного выделения теплоты при горении газовой смеси происходит прогрев относительно тонкого приповерхностного слоя капли, и

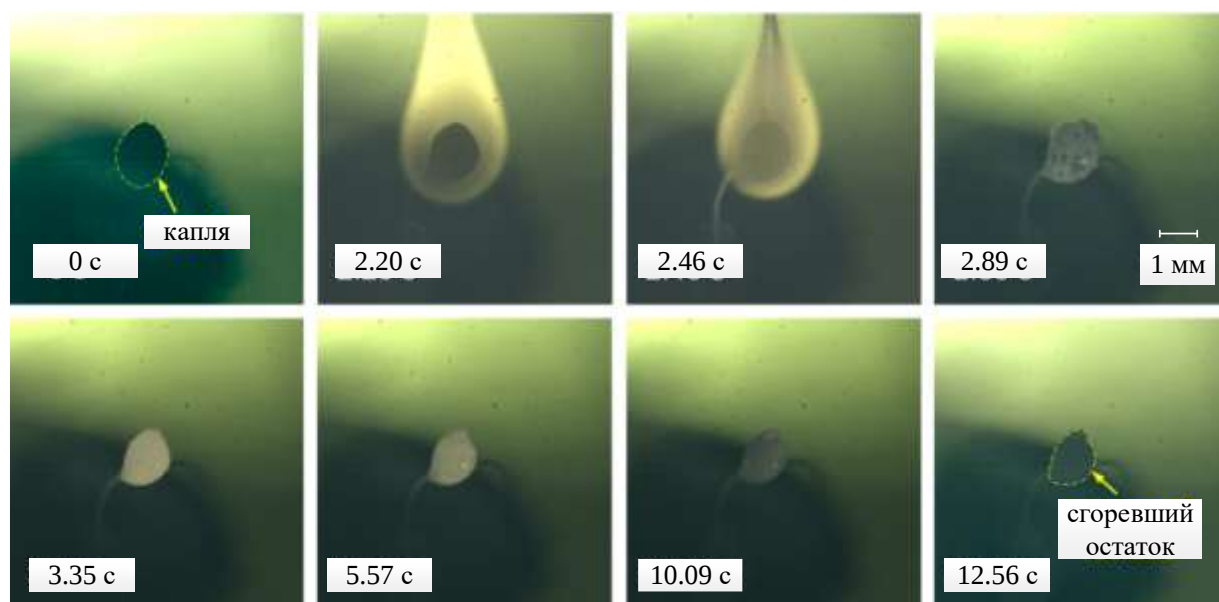
начинается гетерогенное зажигание твердого остатка. В условиях гетерогенного горения твердого остатка происходит его послойное выгорание. Фронт горения движется в направлении глубинных слоев капли. Длительность всей совокупности процессов от момента газофазного зажигания до выгорания твердого остатка при $t_g=600\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет 15–35 с. Следует отметить, что снижение температуры t_2 с максимального значения до температуры окружающей среды t_g происходит менее интенсивно по сравнению с t_1 . Это объясняется следующим. После выгорания газовой смеси в процессе горения твердого остатка выделяется теплота, которая из зоны гетерогенного экзотермического разложения отводится в окружающую среду. По этой причине температура t_2 превышает значение t_g в течение достаточно длительного промежутка времени. Сплошные кривые на рисунке 3.6.3 иллюстрируют, что максимальные температуры в процессе выгорания твердого остатка рассмотренных составов композиционного топлива имеют близкие к t_2 значения, которые не превышают $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.7. Установленные режимы зажигания композиционных топлив

В каждом эксперименте при помещении капли суспензии в камеру сгорания регистрировались несколько основных стадий исследуемого процесса [102]. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО). После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Заканчивается все прогревом твердого остатка, его гетерогенным зажиганием и горением. Типичные кадры исследованных процессов зажигания и выгорания КЖТ показаны на рисунке 3.7.1. Установлены два режима инициирования процесса выгорания. При первом (характерен для ОВУТ) в начале зажигания происходит взрывная частичная фрагментация, и капля разрушается на небольшие части. При этом основной контур исходной (родительской) капли сохраняется на протяжении всего процесса выгорания (рисунок 3.7.1а). При втором режиме (характерен для ВУТ) взрывной распад не регистрировался. Капля после зажигания оставалась монолитной до полного выгорания (рисунок 3.7.1б).



а



б

Рисунок 3.7.1. Типичные кадры видеозаписей с установленными режимами зажигания [129]: а – первый (состав ОВУТ: 90% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля, 10% отработанное турбинное масло, $t_g \approx 800$ °C, $D_d \approx 2$ мм), б – второй (состав ВУТ: 100% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля, температура $t_g \approx 800$ °C, $D_d \approx 2$ мм)

Режим зажигания с диспергированием и измельчением капли топлива (первый режим) обусловлен группой факторов и процессов. При ее нагреве после испарения влаги возможно быстрое вскипание нефтепродукта и выброс летучих продуктов

разложения угольного компонента через поры, характерные структуре капли смешанного топлива. Реализация этих эффектов возможна только при существенном температурном градиенте и маловероятна при температурах, близких к минимальной (пороговой) температуре зажигания капли суспензионного топлива. Взрывное зажигание способствует более быстрому и полному выгоранию топлива за счет дополнительного дробления исходной капли топлива. Увеличивается площадь теплообмена топлива с газовой средой. Этот эффект может использоваться в целях повышения эффективности процесса выгорания в топках котельных установок.

Три компонента ОБУТ (вода, масло, кек или измельченный уголь) при нагреве претерпевают разные физические и химические превращения. В исходном состоянии капля ОБУТ – смесь суспензии и эмульсии. В одной капле могут находиться (в зависимости от ее размеров) десятки микрочастиц угля. Вследствие хорошо перемешивания на стадии приготовления такого топлива вода и масло обволакивают угольные частицы или частицы кека (в зависимости от используемого твердого горючего компонента ОБУТ). Как следствие, эти частицы агломерируются в капле. При интенсивном нагреве вода испаряется и затем закипает. Если малый по размерам (много меньше капли ОБУТ) объем воды расположен вблизи нагреваемой поверхности, то происходит интенсивное парообразование и стремительный отток пара во внешнюю среду. Если же такой микрообъем воды расположен под слоем масла, то вода закипает ранее масла. В результате формируется на некотором удалении от поверхности раздела пора, заполненная паром, давление которого много больше внешнего. Так как микрообъемов воды в составе капли ОБУТ достаточно много, то при интенсивном кипении воды внутри капли давление паров поднимается до значений, при которых внутреннее давление в капле превышает предельное, и капля разрушается или частично диспергирует, как на рисунке 3.7.1а.

В отличие от опытов [120] с нагревом капель ОБУТ в потоке разогретого воздуха в настоящей работе фронт выгорания формировался по всей поверхности капли вследствие равномерного прогрева топлива в муфельной печи. В реальной практике такие условия ближе к топочным, так как топливо впрыскивается в про-

гретую до высоких температур камеру сгорания. В муфельной печи регистрировались более равномерный прогрев и зажигание коксового остатка, чем в условиях наличия натекающего потока воздуха (как в экспериментах [120]), где зажигание локализуется на участке прямого взаимодействия с натекающим потоком. Однако, если частица ОВУТ имела явно выраженные элементы шероховатости или пористости поверхности (например, выступ), то зажигание происходило именно в этой области поверхности, и фронт выгорания распространялся от очага по поверхности капли и затем в более глубокие слои (аналогично экспериментам [121–123]).

3.8. Анализ совместного влияния группы факторов на времена задержки зажигания и длительности горения композиционного топлива

Компонентный состав исследованных ВУТ и ОВУТ приведен в таблице 3.8.1. Установлены зависимости времен задержки зажигания капель ВУТ (рисунок 3.8.1а) и ОВУТ (рисунок 3.8.1б) от температуры в камере сгорания. Наименьшая инерционность зажигания (рисунок 3.8.1а) характерна для суспензии на основе коксующегося угля, поскольку данный компонент имеет высокое содержание летучих и является наименее зольным (таблица 2.2). Капли других составов ВУТ имели большие времена задержки зажигания. Например, в рассматриваемом диапазоне изменения температуры в муфельной печи время задержки зажигания ВУТ 1 отличалось, в среднем, на 15–40% от аналогичного параметра ВУТ 2, полученного на основе отхода производства коксующегося угля. Аналогичные масштабы для ВУТ 3 и ВУТ 4 (рисунок 3.8.1а).

Важно, что инерционность зажигания капель всех составов имеет близкие значения при температурах $t_g \approx 900$ °С. Для ВУТ 3, полученного из слабоспекающегося угля характерна более высокая зольность по сравнению с ВУТ 1 на основе коксующегося угля. Поэтому времена задержки зажигания ВУТ 3 ближе к группе составов на основе отходов углеобогащения (ВУТ 2 и ВУТ 4). В промышленном масштабе изменение инерционности зажигания не будет значительным при использовании ВУТ из отходов углеобогащения или ВУТ из обогащенного угля с зольностью выше 20%, особенно при устойчивой температуре в камере сгорания (выше

900 °С). Однако существенное снижение инерционности зажигания (около 30–40%) можно обеспечить при использовании угля с меньшей зольностью и большим содержанием летучих в составе ВУТ при сжигании в области низких температур в камере сгорания. В целом для исследованных ВУТ характерно снижение длительности инициирования выгорания на 40–45% при увеличении температуры от 700 °С до 900 °С, что связано, в основном, с существенным ускорением эндотермических процессов (испарение влаги и масла, а также термическую деструкцию угля).

Таблица 3.8.1. Исследованные составы

ВУТ 1	55% уголь коксующийся, 45% вода	ОВУТ 1	50% уголь коксующийся, 40% вода, 10% отработ. турбинное масло
ВУТ 2	100% влажный фильтр-кек коксующегося угля	ОВУТ 2	90% влажный фильтр-кек коксующегося угля, 10% отработанное турбинное масло
ВУТ 3	55% уголь слабоспекающийся, 45% вода	ОВУТ 3	50% уголь слабоспекающийся, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло
ВУТ 4	100% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля	ОВУТ 4	90% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля, 10% отработанное турбинное масло

На рисунке 3.8.1б приведены зависимости времени задержки зажигания капель ОВУТ от температуры в камере сгорания для составов с отработанным турбинным маслом. По сравнению с ВУТ (рисунок 3.8.1а) для ОВУТ характерны меньшие времена задержки зажигания, так как при добавлении даже сравнительного небольшого объема нефтепродукта (10% массы) происходит замещение воды горючим компонентом. Испарение нефтепродукта во много раз менее энергозатратный процесс (теплота испарения воды около 2 МДж/кг, теплота испарения нефтяных масел 160–350 кДж/кг). Кроме того, пары нефтепродукта формируют горючую газовую смесь с кислородом и летучими. При горении этой смеси в газовой фазе происходит дополнительный подвод теплоты к поверхности капли (коксового остатка) топлива. Вследствие наличия нефтепродукта, сгорающего в газовой фазе,

у капель ОБУТ чаще всего область пламенного горения больше, чем у ВУТ. В опытах с ВУТ размеры пламенной зоны выгорания зависят от концентрации летучих в составе твердого горючего компонента.

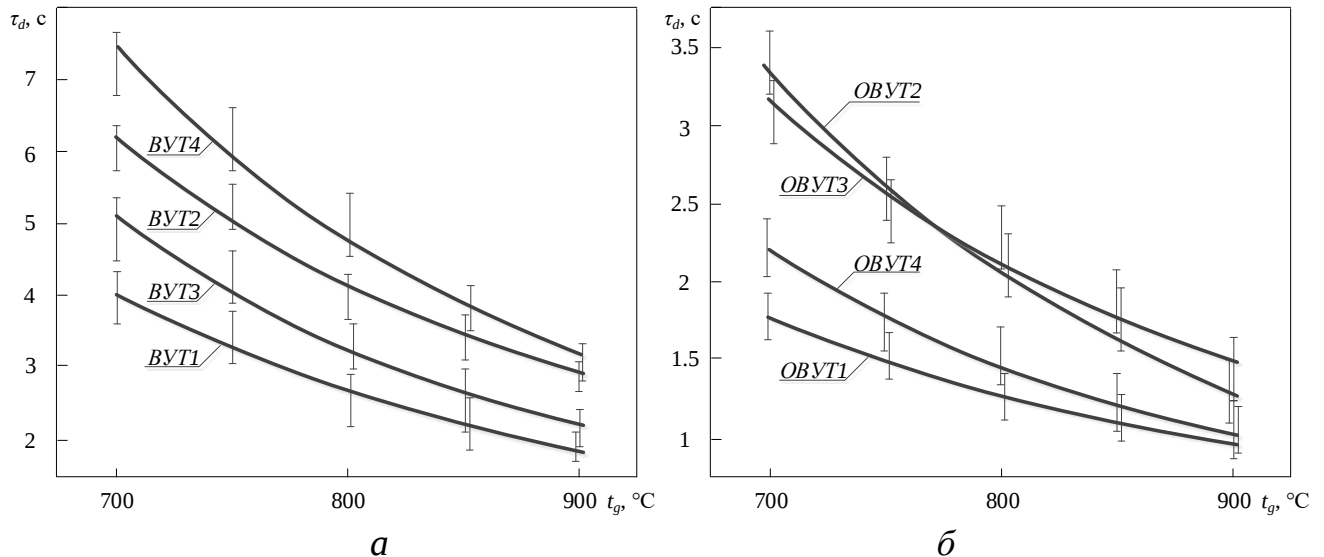


Рисунок 3.8.1. Зависимости времен задержки зажигания капель ВУТ (а) и ОБУТ (б) от температуры в камере сгорания ($D_d \approx 1.4$ мм) [129]

Снижение инерционности процесса зажигания при использовании нефтепродукта (даже отработанного) может быть достаточно существенным. Например, для ВУТ 1 и ОБУТ 1 времена задержки зажигания отличаются в среднем в 1.5–2.2 раза; для суспензий на основе отходов τ_d отличаются в 1.7–2 раза для ВУТ 2 и ОБУТ 2; в 1.4–1.6 раза для ВУТ 3 и ОБУТ 3; в 2.3–3.2 раза для ВУТ 4 и ОБУТ 4 (рисунок 3.8.1б). Отличия инерционности процесса зажигания между разными составами ОБУТ менее выражены по сравнению с ВУТ. Особенно это заметно при возрастании температуры. Полученный результат иллюстрирует большой вклад процессов испарения (эндотермический процесс) и окисления (экзотермический процесс) жидкого горючего компонента в составе КЖТ на зажигание коксового остатка.

Рисунок 3.8.2 иллюстрирует влияние размера капли топлива на инерционность зажигания. Также на рисунке 3.8.2 показаны экспериментальные данные [129] о зажигании капель суспензий с долей воды 60% на основе углей (С60) и (Р60) при 750 °С. Для всех исследованных топлив время задержки зажигания возрастает с

увеличением размера капли топлива, так как для более крупной капли топлива возрастают затраты тепла на эндотермические процессы испарения и разложения. Также, усиливается сток тепла в глубинные слои капли суспензии. При росте диаметра капли от 1 мм до 2 мм времена задержки зажигания увеличивались в 2.5–3 раза для ВУТ (рисунок 3.8.2а) и в 2–4 раза для ОВУТ (рисунок 3.8.2б). Зависимости времени задержки зажигания от размеров капель иллюстрируют необходимость учета распределения температуры по радиусу капель ВУТ и ОВУТ при вычислении времен задержки зажигания.

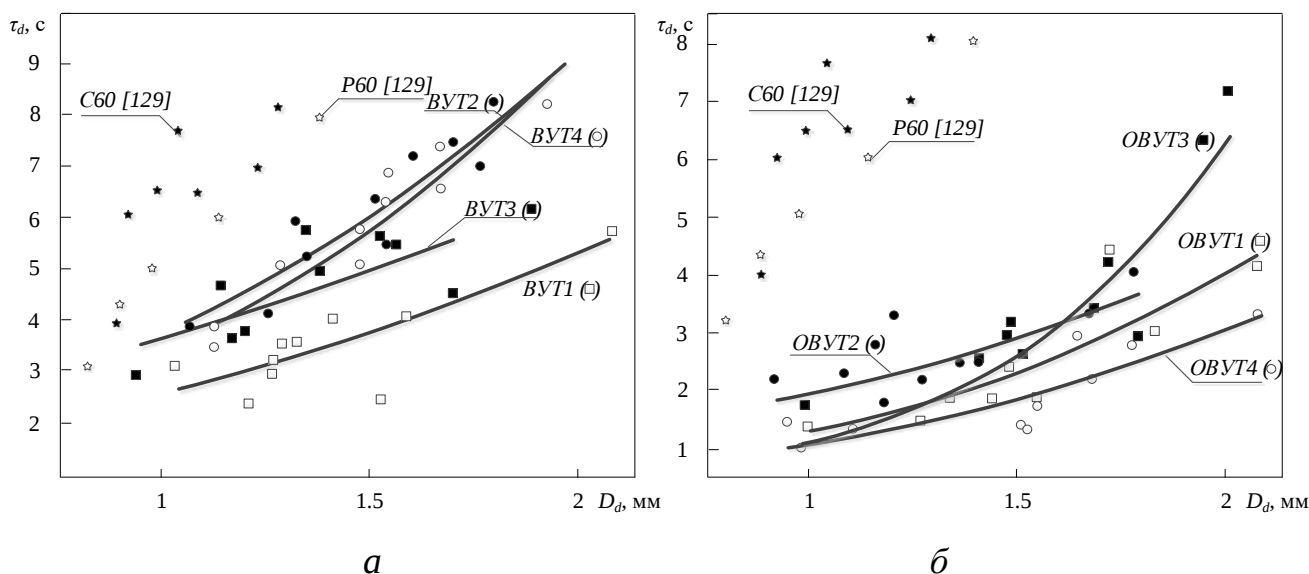


Рисунок 3.8.2. Зависимости времен задержки зажигания капель ВУТ (а) и ОВУТ (б) от размеров капель при температуре в камере сгорания $t_g \approx 800$ °C [129]

В проведенных экспериментах времена задержки зажигания меньше, чем в [129]. Отличие достаточно существенное и усиливается при увеличении размера капель (рисунок 3.8.2). Времена задержки зажигания исследованных ВУТ и ОВУТ меньше в 2–4 раза, чем аналогичный параметр суспензий на основе С60 [129]. Этот результат представляет интерес, поскольку С60 и Р60 являются низкосольными (не более 8% золы) [129], в отличие от используемых в настоящей работе угля и отходов углепереработки. Однако биокomпоненты, используемые в исследовании [129], содержат достаточно мало летучих (12.5% для С60 и 7.2% для Р60). Этот фактор, вероятно, приводит к такому значительному отличию времен задержки зажигания,

поскольку теплота, выделяющаяся при горении летучих, способствует дополнительному прогреву и ускоренному зажиганию твердого остатка. Значительно влияние на зажигание не только зольности, но и содержания летучих в топливах на основе углей и, особенно, отходов углеобогащения. По экспериментальным результатам (рисунки 3.8.1–3.8.2) построены аппроксимационные кривые, описываемые уравнениями: $\tau_d = A_1 \cdot \exp(B_1 \cdot t_g)$; $\tau_d = A_2 \cdot \exp(B_2 \cdot D_d)$. Коэффициенты представлены в табл. 3.8.2.

Таблица 3.8.2. Коэффициенты аппроксимационных выражений для зависимостей времен задержки зажигания от температуры в камере сгорания и размера капли

	A1	B1	A2	B2
ВУТ 1	69.588	-0.004	1.461	0.6074
ВУТ 2	76.705	-0.004	1.5764	0.8706
ВУТ 3	171.58	-0.005	1.4998	0.6712
ВУТ 4	204.33	-0.005	1.2625	0.9949
ОВУТ 1	20.946	-0.003	0.3984	1.1586
ОВУТ 2	134.06	-0.005	0.9963	0.7058
ОВУТ 3	63.245	-0.004	0.414	1.2833
ОВУТ 4	41.238	-0.004	0.4578	0.922

Рисунок 3.8.3а иллюстрирует влияние массовой концентрации угля в составе топлива на инерционность зажигания, длительность и скорость сгорания. Увеличение доли угля способствует (рисунок 3.8.3а) значительному снижению времен задержки зажигания (на 50–75%), поскольку при этом снижается доля воды и увеличивается масса способного к реагированию вещества. Увеличивается и общее количество летучих, оказывающих сильное влияние на достижение условий зажигания. Рисунок 3.8.3б иллюстрирует влияние концентрации жидкого горючего компонента на инерционность зажигания капель суспензии. Увеличение доли масла до 20% приводило к снижению инерционности гетерогенного зажигания коксового остатка в 3.2–4.8 раза (рисунок 3.8.3б). В этом случае необходимая для зажигания концентрация горючих газов достигается быстрее, и они сгорают с большим теп-

ловыделением. Соответственно, коксовый остаток прогревается в процессе газо-фазного выгорания горючей жидкости.

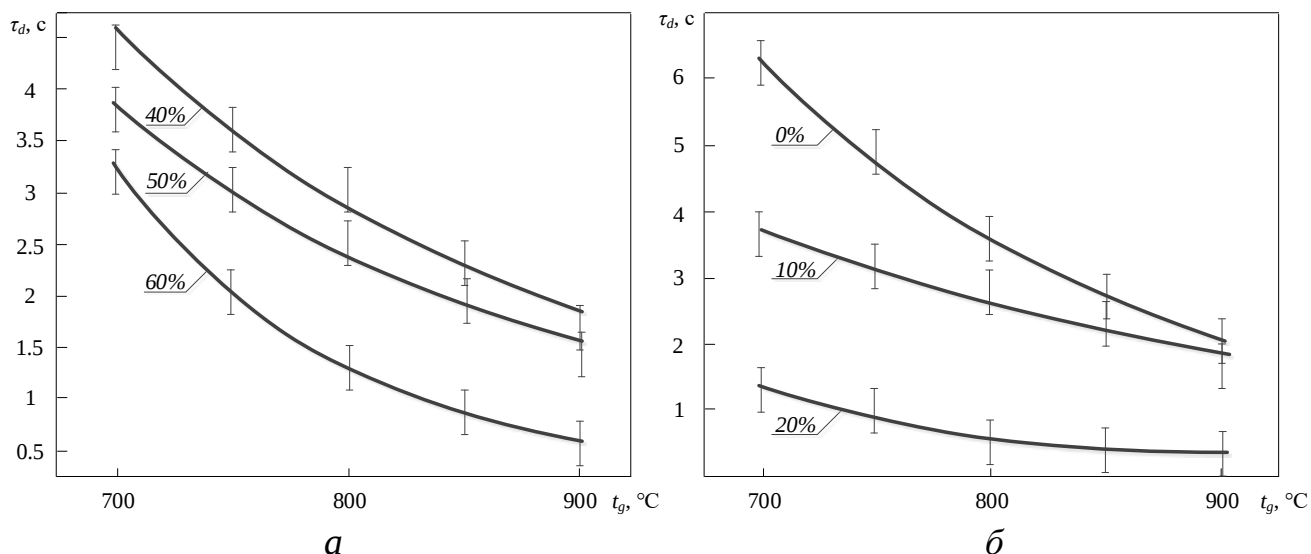


Рисунок 3.8.3. Зависимости времен задержки зажигания каплей ОВУТ на основе коксующегося угля и отработанного турбинного масла от температуры в камере сгорания при $D_d \approx 1.7$ мм и варьировании концентрации угля (а) и варьировании концентрации отработанного турбинного масла (б) [129]

3.9. Анализ совместного влияния группы факторов на длительность и скорости выгорания композиционного топлива

Параметр τ_b представлял время от момента зажигания до момента окончания выгорания. На рисунке 3.9.1 представлены зависимости времен полного выгорания ВУТ и ОВУТ от размеров каплей, а также данные [129], полученные при сжигании каплей суспензий на основе растительных компонентов. Увеличение размера каплей приводило к росту длительности выгорания всех составов из-за большей массы реагирующего вещества. Минимальные длительности выгорания имели капли суспензии на основе угля высокого качества (коксового), как в группе составов ВУТ (рисунок 3.9.1а), так и ОВУТ (рисунок 3.9.1б). Низкая зольность ВУТ 1 способствует быстрому прогоранию органической массы без аккумулялирования теплоты в зольном остатке. Скорее всего, по этой же причине длительности выгорания каплей суспензий, приготовленных из растительных коксов [129], меньше, чем для угольных суспензий (рисунок 3.9.1). В случае добавления масла в такое

топливо возникали микровзрывы, которые дополнительно способствовали снижению времени выгорания на 25–40% (ОВУТ 1 на рисунке 3.9.1б).

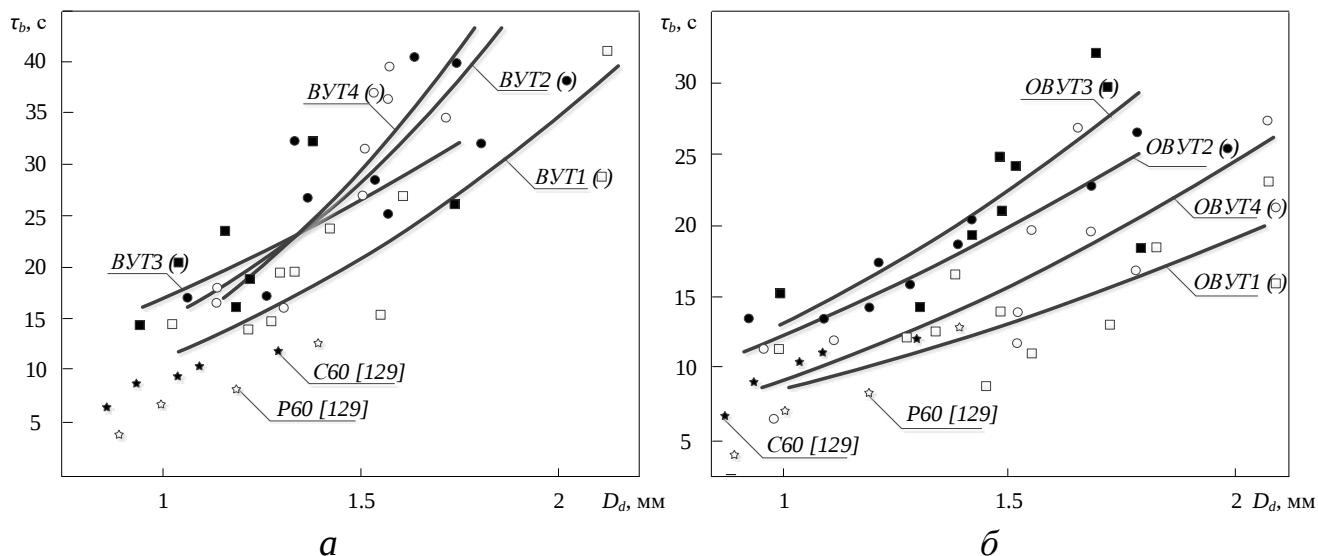


Рисунок 3.9.1. Длительности выгорания каплей исследованных композиций ВУТ (а) и ОВУТ (б) при варьировании размеров каплей и температуре в камере сгорания $t_g \approx 800$ °С; также приведены данные экспериментов [129]

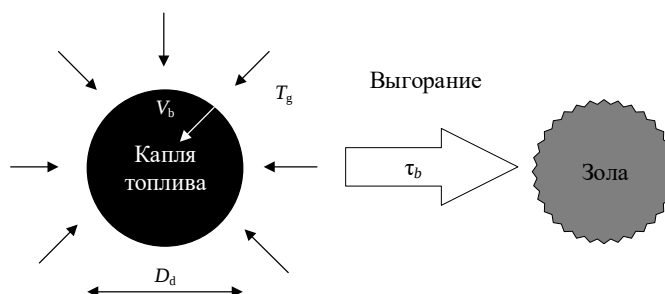


Рисунок 3.9.2. Схема вычисления скорости выгорания капли (изменения площади гетерогенного горения во времени) топливной суспензии (по аналогии с методикой, применяемой в опытах [129]).

Для вычисления скорости горения использовались схема (Рис 3.9.2) и формула, примененные при обработке результатов экспериментов [129]:

$$V_b = D_d^2 / \tau_b,$$

где V_b – скорость горения, D_d – диаметр капли, τ_b – время полного сгорания.

Важно отметить, что для определения скорости горения топлива можно использовать и другие схемы, например, с контролем изменения линейного размера

частицы топлива или изменением ее свечения при горении. В целом получаемые закономерности при использовании всех этих подходов хорошо соответствуют. Количественные отличия времен выгорания и скоростей горения возможны, но масштабы отличия этих параметров для топливных композиций с разными компонентными составами могут быть достоверно спрогнозированы при применении любого из указанных подходов. С точки зрения трудоемкости вычислений подход [129] можно считать одним из наиболее рациональных. Поэтому принято решение применять контроль изменения во времени производства двух диаметров капли по методике [129].

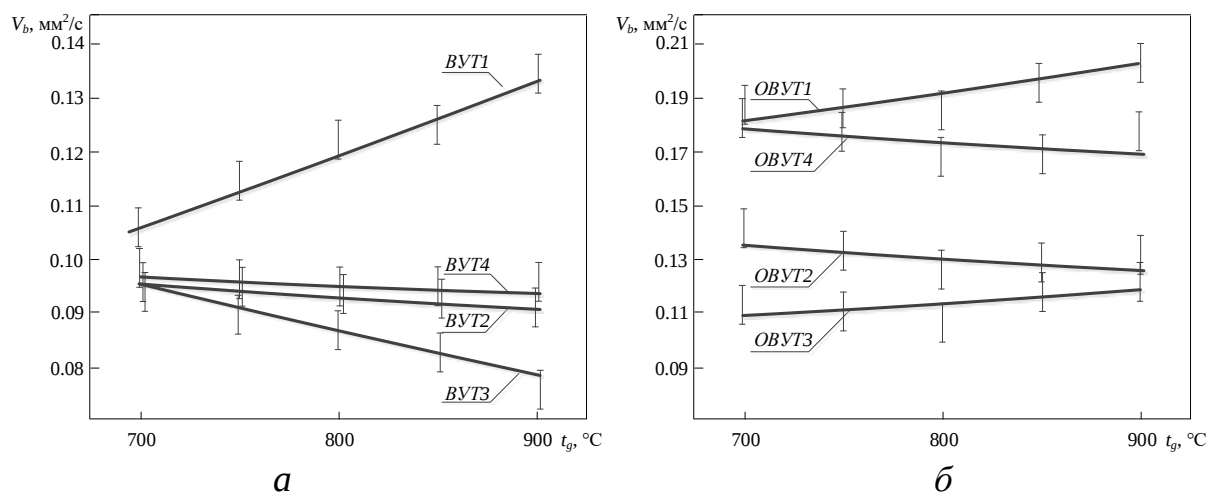


Рисунок 3.9.3. Скорости горения капель исследованных композиций ВУТ (а) и ОВУТ (б) при варьировании температуры в камере сгорания ($D_d \approx 1.4$ мм) [129]

Рисунок 3.9.3 иллюстрирует влияние температуры на скорости горения ВУТ и ОВУТ. Установлен разномасштабный и разнознаковый вклад группы факторов. В частности, зарегистрированы рост и снижение скорости горения при повышении температуры в камере сгорания. Например, скорости горения капель при возрастании температуры от 700 °С до 900 °С в среднем изменяются следующим образом: ВУТ 1 – возрастание на 18%; ВУТ 2 – снижение на 5%; ВУТ 3 – снижение на 16%; ВУТ 4 – снижение на 5% (рисунок 3.9.3а). Для ОВУТ 1 скорости горения возрастали в среднем на 12%, для ОВУТ 2 – практически не изменялись, для ОВУТ 3 – увеличивались на 5%, для ОВУТ 4 – практически не изменялись. Также важно отметить, что скорости горения капель ОВУТ, в целом, выше, чем ВУТ. Скорости

горения могут отличаться в 1.5–2 раза (рисунок 3.9.3). Это обусловлено соответствующим установленным характером изменения длительностей процессов горения капель топлив.

Зависимости скорости горения капель ВУТ и ОВУТ от их размеров приведены на рисунке 3.9.4. Также показаны аналогичные зависимости для капель суспензии, полученной у авторов [129]. Скорость горения исследованных в [129] суспензий практически не зависела от размера капель и контролировалась, в основном, диффузией кислорода к топливу. В настоящей работе скорости горения ОВУТ зависят от размеров капель (рисунок 3.9.4б), а скорости горения ВУТ зависят от размеров капель в меньшей степени (рисунок 3.9.4а). Этот результат обусловлен влиянием скоростей испарения жидкого горючего компонента на условия формирования горючей парогазовой смеси вблизи поверхности капли топлива. Зависимости скоростей горения топливных суспензий от температуры являются экспоненциальными. Их можно объяснить Аррениусовскими зависимостями скоростей газофазного и гетерогенного выгорания компонентов топлив. В среднем, скорость сгорания капли ОВУТ увеличивалась на 30–55% при возрастании размера капли в диапазоне 1–2 мм. Также следует отметить, что скорости горения капель ВУТ и ОВУТ на основе углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки меньше, чем аналогичный параметр для капель суспензий [129].

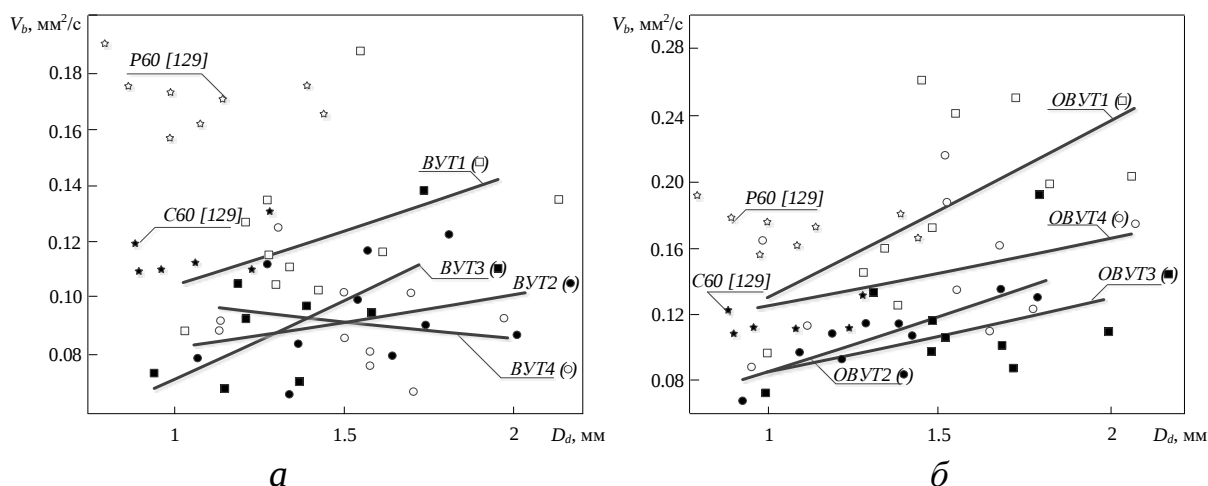


Рисунок 3.9.4. Скорости горения капель исследованных композиций ВУТ (а) и ОВУТ (б) при варьировании размеров капель и температуре в камере сгорания $t_g \approx 800^\circ\text{C}$; также приведены данные экспериментов [129]

Полученные зависимости (рисунки 3.9.3–3.9.4) могут быть описаны выражениями: $\tau_b = C_1 \cdot \exp(D_1 \cdot t_g)$; $\tau_b = C_2 \cdot \exp(D_2 \cdot D_d)$ и $V_b = E_1 \cdot \exp(F_1 \cdot t_g)$; $V_b = E_2 \cdot \exp(F_2 \cdot D_d)$. Коэффициенты уравнений представлены в таблице 3.9.1.

Таблица 3.9.1. Коэффициенты аппроксимационных выражений для зависимостей времен и скоростей горения капель ВУТ и ОВУТ от температуры в камере сгорания и размеров капель

		C_1	D_1	C_2	D_2
Время выгорания	ВУТ 1	29.294	$-8 \cdot 10^{-4}$	4.8361	0.9812
	ВУТ 2	35.787	$-7 \cdot 10^{-4}$	5.2116	1.1342
	ВУТ 3	24.778	$-4 \cdot 10^{-4}$	6.5116	0.9536
	ВУТ 4	53.551	-0.001	3.0656	1.5023
	ОВУТ 1	29.506	-0.001	5.2833	0.6255
	ОВУТ 2	$\tau_b = -0.0064 t_g + 19.802$		5.7554	0.8411
	ОВУТ 3	$\tau_b = -0.0214 t_g + 35.503$		5.7985	0.8905
	ОВУТ 4	$\tau_b = -0.0056 t_g + 19.041$		3.4404	1.0017
		E_1	F_1	E_2	F_2
Скорость горения	ВУТ 1	0.0473	0.0011	0.0777	0.3057
	ВУТ 2	0.1168	$-3 \cdot 10^{-4}$	0.0684	0.1948
	ВУТ 3	0.1728	$-9 \cdot 10^{-4}$	0.0421	0.561
	ВУТ 4	0.1074	$-2 \cdot 10^{-4}$	0.1131	-0.153
	ОВУТ 1	0.1424	0.0003	0.0611	0.7074
	ОВУТ 2	0.1533	$-2 \cdot 10^{-4}$	0.0445	0.6578
	ОВУТ 3	0.0812	0.0004	0.0603	0.3849
	ОВУТ 4	0.1196	0.0004	0.0929	0.2881

Рисунки 3.9.5а и 3.9.5б иллюстрируют влияние массовой концентрации угля и отработанного турбинного масла в составе топлива на скорость горения капель. При повышении доли твердого вещества в составе суспензионного топлива зарегистрировано достаточно сложное по характеру изменение скорости горения (рису-

нок 3.9.5a). Для капли топлива с более высокой концентрацией угольного компонента свойственна самая низкая скорость прогорания (рисунок 3.9.5a). В то же время капля топлива со средней долей угля ($\approx 50\%$) имела максимальную скорость горения (рисунок 3.9.5a). При увеличении концентрации масла регистрировали увеличение скорости горения капли (рисунок 3.9.5б).

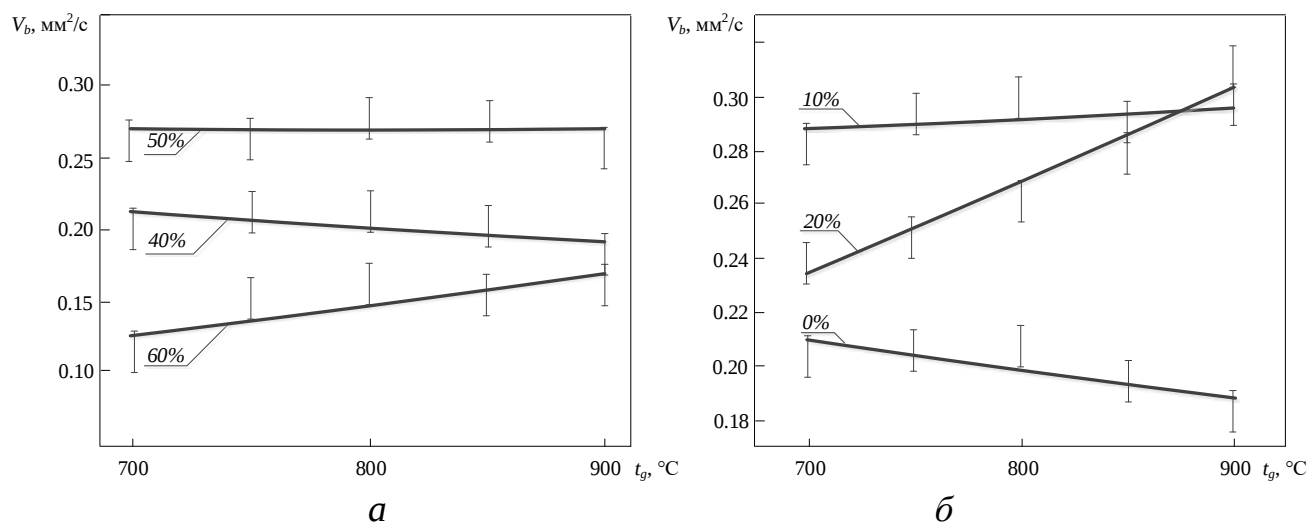


Рисунок 3.9.5. Типичные скорости горения капель ОБУТ [129] на основе коксующегося угля и отработанного турбинного масла (10% масс.) при варьировании температуры в камере сгорания при $D_d \approx 1.7$ мм и концентрации угля (a) и варьировании концентрации отработанного турбинного масла (б)

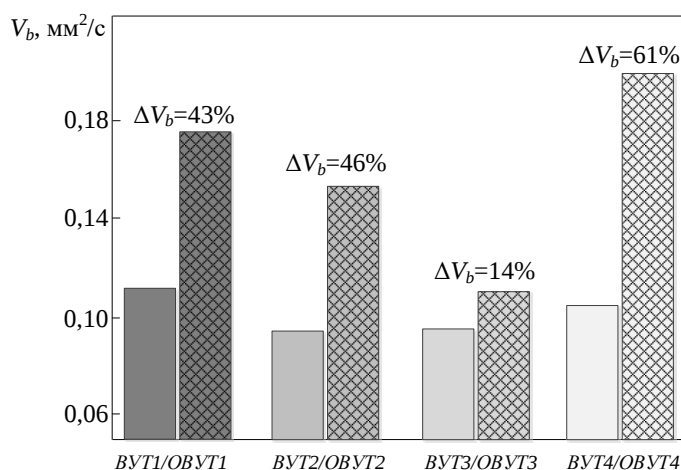


Рисунок 3.9.6. Сравнение скоростей выгорания ($D_d \approx 1.4$ мм, $t_g \approx 700$ $^\circ\text{C}$) [129]

Рисунок 3.9.6 иллюстрирует отличия скоростей горения капель ВУТ и ОБУТ разных составов. Во всех случаях добавление отработанного нефтепродукта приводило к ускорению горения. Отличие достаточно существенное и может достигать

50–60%. Самыми высокими скоростями горения обладают составы ОБУТ на основе коксующегося угля, а также на основе отхода обогащения слабоспекающегося угля. Высокие скорости сгорания достигаются за счет эффекта микро-взрывного диспергирования перед зажиганием (с интенсивной фрагментацией капли) и в процессе выгорания, способствующего более интенсивному взаимодействию с окислителем (так как капля КЖТ уменьшается в десятки раз). Возникновению микро-взрыва предшествует образование одного или двух пузырей вблизи центра капли, что способствует более полной фрагментации. На образование пузырей непосредственное влияние оказывает разница волатильности компонентов (воды и масла). Для образования пузыря внутри капли необходим ее прогрев до температуры кипения менее волатильного компонента (воды). На образование пузырьков внутри капли с ее последующим разрушением оказывает влияние степень перегрева (должен достигаться критический перепад температуры). Разрушение происходит вследствие расширения пузырей в капле и снижения её поверхностного натяжения из-за перегрева.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать несколько рекомендаций для снижения инерционности зажигания и увеличения скорости горения суспензионных топлив:

- добавление масла в суспензию приводит к дроблению капли (интенсификация эффекта «микровзрывов»). Как следствие, снижаются инерционность зажигания и длительность выгорания;
- увеличение доли жидкого горючего компонента ведет к росту скорости горения;
- для уменьшения времени задержки зажигания и длительности выгорания целесообразно уменьшать размеры капель;
- увеличивать температуру в камере сгорания целесообразно для уменьшения времени задержки зажигания, но не для увеличения скорости горения;
- увеличить скорость горения капель ВУТ можно за счет использования в качестве добавки угольного компонента (в частности, низкозольного угля). Аналогичный результат достигается и при добавлении в суспензию жидкого горючего

компонента.

Наиболее важным направлением дальнейших исследований является анализ изменения скоростей горения капель топливных суспензий не только при варьировании типа и концентрации основных горючих компонентов, но и дополнительных примесей. Последние добавляют для повышения экологических, экономических, энергетических характеристик работы котельных установок и двигателей, а также улучшения свойств топливных композиций (реологических, теплофизических, термокинетических и др.). Изучение скоростей горения суспензий ОБУТ и ВУТ является самостоятельным научным направлением исследований.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при развитии имеющихся и перспективных технологий сжигания водоугольных и органомоугольных топливных суспензий в направлении широкого применения в качестве основных горючих компонентов совокупности отходов углеобогащения и нефтепереработки.

Важным результатом проведенных научных исследований следует считать сформулированные аппроксимационные выражения для установленных зависимостей. С их применением возможно развитие моделей зажигания и выгорания суспензий ОБУТ в топочных камерах котельных установок большой и малой энергетики.

Наибольшую ценность представляют результаты выполненного комплексного анализа преимуществ и недостатков использования суспензий ОБУТ и ВУТ в качестве основных топлив на тепловых электрических станциях. Более 40% общемировой электрической энергии в год вырабатывается тепловыми электрическими станциями. Почти половина последних работает на угле. Именно такие угольные тепловые электрические станции являются основными источниками [124–127] загрязнения окружающей среды и ухудшения здоровья населения планеты. Глобальный переход на суспензионные топлива (ВУТ и ОБУТ) вместо угля поможет расширить сырьевую базу, снизить антропогенные выбросы, повысить пожаровзрывобезопасность производства теплоты и электрической энергии. Важно полученные научные результаты исследований широко внедрять в образовательные материалы

и стандарты для своевременных изменений в концепциях развития теплоэнергетики в мире.

3.10. Анализ влияния ТКО и отработанного масла в составе композиционного топлива на концентрации антропогенных выбросов при сжигании топливных композиций

Анализ концентраций вредных газов в продуктах сгорания композитного топлива выполнен для двух основных компонентов: NO_x и SO_x (Рисунок 3.10.1). Концентрация оксидов углерода в дымовых газах при сжигании топлива с разными компонентами из числа типичных твердых коммунальных отходов отличается менее существенно.

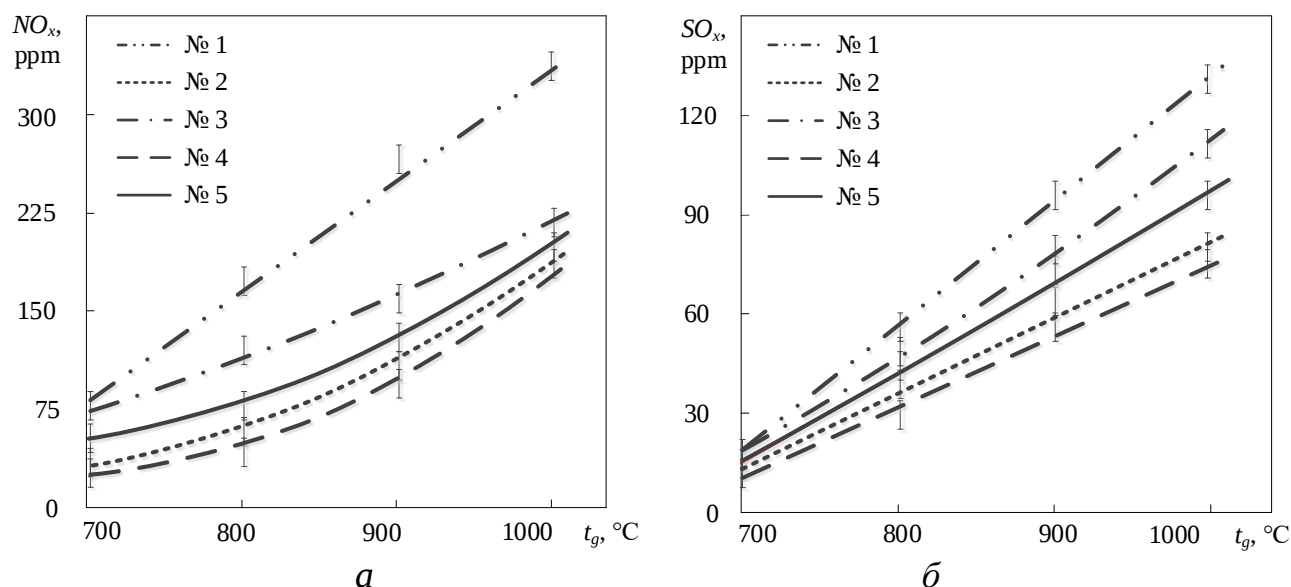


Рис 3.10.1. Зависимости концентрации NO_x (а) и SO_x (б) в газообразных продуктах сгорания композитного топлива от температуры воздуха, при которой происходило инициирование процесса горения [103]: № 1 – кек 100 %; № 2 – кек 90 %, древесина 10 %; № 3 – кек 90 %, резина 10 %; № 4 – кек 90 %, пластик 10 %; № 5 – кек 90 %, картон 10 %

Согласно элементному составу компонентов топлива содержание азота и серы в типичных твердых коммунальных отходах в 2–10 раз меньше, чем в исходном

кеке. Таким образом, в результате приготовления топливного состава массовая концентрация кека снижается за счет добавления твердого горючего компонента (древесины, резины, пластика, картона), содержащего меньшее количество азота и серы. Соответственно в результате сжигания такого топлива при условиях, идентичных условиям сжигания состава № 1 (кек 100%) уменьшается концентрация основных антропогенных выбросов NO_x и SO_x в атмосферу. Стоит отметить, что при добавлении твердых коммунальных отходов (например, пластика) в состав топлива теплота, выделяющаяся в процессе его горения, эквивалентна аналогичной характеристике при сжигании кека без каких-либо добавок. В некоторых случаях, например, при добавлении резины, тепловой эффект процесса горения топлива превосходит это значение при сжигании кека. Можно сделать вывод, что при добавлении типичных твердых коммунальных отходов в состав композитного топлива в процессе его горения выделяется эквивалентное количество энергии с меньшей концентрацией основных антропогенных выбросов в дымовых газах.

Результаты, представленные на рисунке 3.10.1, хорошо соответствуют данным элементного состава компонентов топлива. Установлено, что концентрация NO_x и SO_x в продуктах сгорания разных составов топлива снижается в следующей последовательности при добавлении компонентов в кек: резина, картон, древесина, пластик. Для состава № 4 (кек 90%, пластик 10%) характерны минимальные концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах по сравнению с другими составами при идентичных условиях сжигания. Установлено, что для составов № 1 и 4 максимальное отличие концентраций NO_x составляет 70%, SO_x – 45%. В абсолютных единицах значения этих отличий составляют 125 ppm и 50 ppm, соответственно. Такие отличия являются достаточно существенными, т.к. максимальные концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания кека составляют около 300 ppm и около 130 ppm (рисунок 3.10.1), соответственно.

При инициировании и протекании процесса горения топлива в условиях больших температур возрастает концентрация антропогенных компонентов в дымовых газах. При варьировании температуры среды окислителя в диапазоне 700–1000 °C концентрация NO_x и SO_x увеличивается в 4–6 раз для всех исследованных составов

композитного жидкого топлива. Полученный результат объясняется увеличением интенсивности и полноты взаимодействия исходных компонентов топлива с окислителем. В области относительно высоких температур скорость реакции окисления азота и серы также высока. Это является причиной достаточно существенного отличия полученных результатов при $t_g=700\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 3.10.1).

3.11. Относительные показатели эффективности КЖТ

Для оценки целесообразности применения типичных твердых коммунальных отходов в качестве компонентов КЖТ выполнен комплексный анализ, учитывающий экономические, экологические и энергетические аспекты [76]. Были проведены расчеты относительных показателей эффективности сжигания топлив с и без твердых коммунальных отходов при одинаковой массе. Расчеты выполнены для пяти составов с использованием выражений [76]:

$$D_{CF+MSW}^{NOx} = Q_{s,V}^{a, CF+MSW} / (C_{CF+MSW} \cdot NO_{x_CF+MSW}); \quad (3.1)$$

$$D_{CF+MSW}^{SOx} = Q_{s,V}^{a, CF+MSW} / (C_{CF+MSW} \cdot SO_{x_CF+MSW}); \quad (3.2)$$

$$D_{CF+MSW}^{NOx\&SOx} = D_{CF+MSW}^{NOx} \cdot D_{CF+MSW}^{SOx}, \quad (3.3)$$

где D – показатель эффективности; \$/кг; $Q_{s,V}^a$ – тепловой эффект процесса горения топлива, т.е. калорийность (таблица 2.1), МДж/кг; NO_x – концентрация оксида азота, ppm; SO_x – концентрация оксида серы, ppm; C – стоимость, индексы CF+MSW – композитное топливо с добавлением твердых коммунальных отходов, NO_x – оксид азота, SO_x – оксид серы.

Максимальные значения концентраций антропогенных выбросов (рисунок 3.10.1) при $t_g \approx 800\text{ }^\circ\text{C}$ использованы в расчетах. Стоимости разных составов топлива вычислялась пропорционально концентрации компонентов. Предполагалось, что основной вклад в стоимость отхода углеобогащения (кек) и твердых коммунальных отходов (древесина, резина, пластик, картон) составляют затраты на их транспортировку от места складирования до места приготовления топлива – 0.0058 \$/кг.

Для наглядной иллюстрации преимуществ применения топлив с добавлением твердых коммунальных отходов введен относительный показатель эффектив-

ности, равный отношению показателя эффективности композитного топлива с добавлением твердых коммунальных отходов к показателю эффективности композитного топлива без каких-либо добавок:

$$D_{relative} = D_{CF+MSW}^{NOx\&SOx} / D_{CF}^{NOx\&SOx}. \quad (3.4)$$

Результаты выполненных вычислений приведены на рисунок 3.11.1. Для состава № 1 (кек 100%) $D_{relative} = 1$, т.к. для анализа эффективности добавления твердых коммунальных отходов в состав композитных жидких топлив сравнение показателей эффективности составов топлива № 2–4 выполнено с аналогичной характеристикой для чистого кека. Значения $D_{relative} > 1$ для составов топлива № 2–4 иллюстрируют перспективность применения на практике технологии утилизации твердых коммунальных отходов путем их сжигания в составе КЖТ.

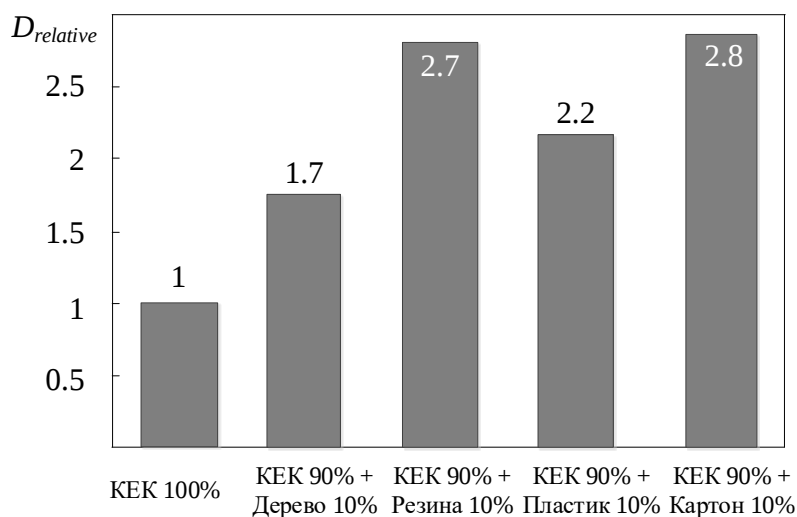


Рисунок 3.11.1. Относительные показатели эффективности композитных топлив с разными ТКО при $t_g \approx 800$ °С

Полученные результаты (рисунок 3.11.1) позволяют сделать вывод, что с точки зрения комплексного показателя эффективности, учитывающего экономический, экологический и энергетический индикаторы, более перспективными являются составы № 3 (кек К 90%, резина 10%); № 5 (кек К 90%, картон 10%). Тем не менее, эффективность всех составов композитных жидких топлив с добавлением твердых коммунальных отходов выше аналогичного показателя для кека в 1.5–3 раза (рисунок 3.11.1).

Были проведены расчеты относительных показателей эффективности сжигания суспензионных топлив в сравнении с угольной пылью. Проводилось сравнение ВУТ и ОВУТ без и с твердых коммунальных отходов, а также угольной пылью. Полученные результаты (рисунок 3.11.2) позволяют сделать вывод, что с точки зрения комплексного показателя эффективности, учитывающего экономический, экологический и энергетический аспекты, более перспективными являются состав «ВУТ+ТКО». Тем не менее, эффективность всех составов композитных жидких топлив с добавлением твердых коммунальных отходов выше аналогичного показателя для угольной пыли. Основные преимущества обеспечиваются за счет малой стоимости и низких концентраций двух основных (наиболее опасных) антропогенных выбросов (NO_x и SO_x).

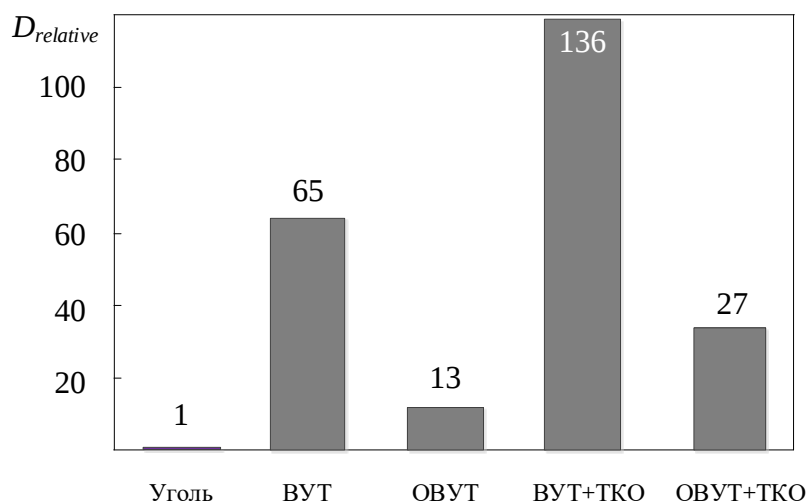


Рисунок 3.11.2. Относительные показатели эффективности композитных топлив с разным компонентным составом при $t_g \approx 800^\circ\text{C}$

Сжигание одинаковой массы (например, при расчете для 1 кг) не всегда будет позволять адекватно оценивать привлекательность топлива по сравнению с используемым. Целесообразно оценивать эффективность сжигаемых топлив в расчете на идентичную калорийность. Поэтому выполнены расчеты относительных значений масс топлива для аналогичных составов из п. 3.11.2 для получения 30 МДж тепла по сравнению с угольной пылью с использованием выражений:

$$M_{absolute} = \frac{30 \text{ MJ}}{Q_{s,V}^a}, \text{ kg}; \quad (3.5)$$

$$M_{relative} = \frac{M_{absolute}^{CWS(CWSP)}}{M_{absolute}^{coal}}. \quad (3.6)$$

где M – показатель эффективности; кг; $Q_{s,v}^a$ – тепловой эффект процесса горения топлива (таблица 2.1), МДж/кг.

Полученные результаты (рисунок 3.11.3) показывают, что ВУТ является предпочтительным по комплексному показателю, включающий экологические, экономические и энергетические показатели. Тем не менее, эффективность всех составов композитных жидких топлив с добавлением твердых коммунальных отходов выше аналогичного показателя для угольной пыли.

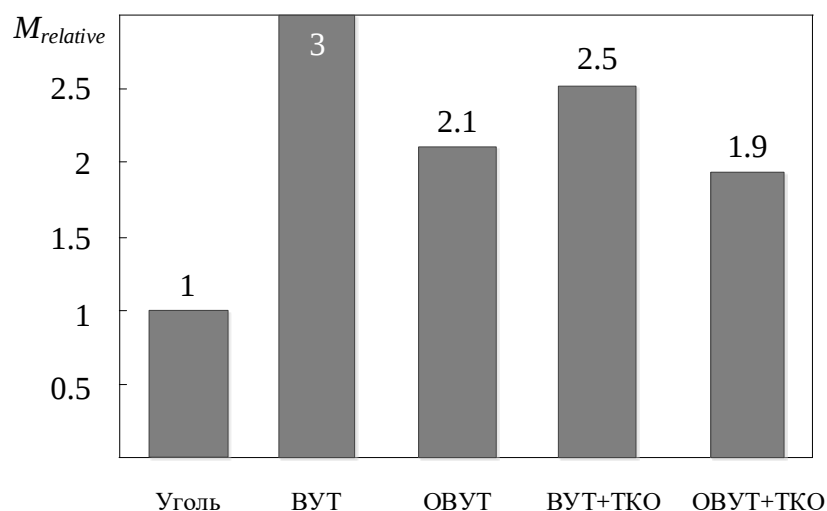


Рисунок 3.11.3. Относительные значения масс топлива для получения идентичного количества теплоты по сравнению с угольной пылью при $t_g \approx 800$ °С

Помимо оценки относительных значений масс топлива для получения идентичного количества теплоты по сравнению с угольной пылью весьма важным показателем является количество полученной золы после сжигания топлива. Поэтому выполнены расчеты относительных масс золы при сжигании объема КЖТ, позволяющего получить идентичное количество теплоты при сравнении с угольной пылью. Полученные результаты (рисунок 3.11.4) позволяют сделать вывод, что при использовании композитных жидких топлив золы будет образовываться больше в 3–6 раз. Предполагается дальнейшее использование золы в различных областях промышленности.

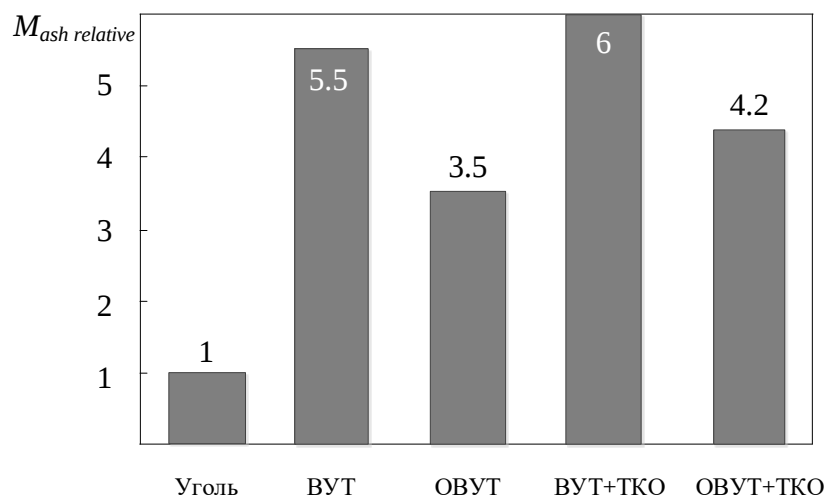


Рисунок 3.11.4. Относительные значения массы золы при сжигании объема КЖТ, позволяющего получить идентичное количество теплоты при сжигании угля по сравнению с угольной пылью при $t_g \approx 800\ ^\circ\text{C}$

Выполненные оценки являются основной для широкого вовлечения твердых коммунальных отходов в составе КЖТ в энергетику, как весьма приемлемый вариант с экологической, экономической и энергетической точки зрения.

Выводы по третьей главе

1. Выделены основные стадии взаимосвязанных физико-химических процессов при горении КЖТ с твердыми коммунальными отходами. Начинается все с инертного прогрева, затем происходит испарение влаги, далее термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО). После этого горючие газы смешиваются с окислителем, в результате происходит воспламенение газовой смеси и ее выгорание. Заканчивается все прогревом твердого остатка, его гетерогенным зажиганием и горением.
2. Увеличение концентрации жидкого горючего компонента может существенно влиять на предельные температуры зажигания ОВУТ $t_g^{\lim}$, а также интегральные характеристики исследуемых процессов – времена задержки зажигания τ_d и времена горения τ_c . Рост или снижение этих параметров определяется влажностью, тепловым эффектом испарения, температурой воспламенения и тепловым эффектом сгорания жидкого горючего компонента в составе ОВУТ. От-

носительно небольшое (до 10 %) добавление высококачественного обогащенного угля в ОВУТ может приводить к снижению времен τ_d и τ_c на 20–30 %. Этот результат показывает, что для ОВУТ на основе фильтр-кеков с худшими интегральными характеристиками зажигания одним из подходов оптимизации процессов горения может выступить добавление небольших объемов угля. Увеличение концентрации воды в ОВУТ на 5–15 % приводит к ухудшению характеристик процесса инициирования горения на 30–40 %. Этот эффект влияет на две стадии: инертный прогрев капли и испарение влаги из ее приповерхностного слоя.

3. На примере рассмотренных составов композиционного топлива (фильтр-кек с добавками древесины, пищевых отходов, пластика, картона), экспериментально обоснована устойчивость зажигания и последующего горения капель топлива до полного выгорания в условиях, характерных для топок котлов. Установлено, что температура воздуха 450 °С является минимальной, необходимой для устойчивого зажигания капли КЖТ. Интенсивность процесса зажигания для рассмотренных составов возрастает в следующей последовательности при добавлении компонентов в кек: древесина, резина, пластик, картон. Для состава кек 90%, картон 10% характерны минимальные времена задержки зажигания по сравнению с другими составами при идентичных условиях нагрева. Установлена область гарантированных времен задержки зажигания капель размерами около 1 мм рассмотренных составов композиционного топлива в диапазоне варьирования температуры окружающей среды 600–1000 °С. Минимальные значения времен задержки зажигания составляют около 3 с, максимальные – около 25 с. Максимальное отличие времен задержки зажигания для составов с разными компонентами составляет менее 25% в области относительно невысоких температур (600–700 °С). При температурах окружающей среды более 900 °С отличие времен задержки зажигания для разных составов топлива не превышает 5–10%. Получено аппроксимационное выражение $\tau_d = f(t_g)$ для оценки средних значений времен задержки зажигания капель КЖТ (фильтр-кек 85%, ТКО 10%, масло 5%).

4. При добавлении типичных твердых коммунальных отходов в состав композиционного топлива в процессе его горения выделяется эквивалентное количество энергии с меньшей концентрацией основных антропогенных выбросов в составе газообразных продуктов сгорания по сравнению с топливом без добавления отходов. Максимальное отличие концентраций NO_x и SO_x для таких составов топлив составляет около 60% и 35%, соответственно. В абсолютных единицах измерения эти отличия составляют около 110 ppm и 45 ppm. Полученный результат характеризует достаточно существенное влияние добавок из числа твердых коммунальных отходов в состав композиционного топлива на снижение концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах, т.к. максимальные концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания кека составляют около 300 ppm и около 130 ppm, соответственно.
5. Скорости выгорания КЖТ, приготовленных на основе отходов углеобогащения (фильтр-кеков), близки (отличия менее 10%) к скоростям горения суспензий, приготовленных из углей. Экономические и экологические индикаторы кеков в несколько раз выше, чем у углей. Поэтому целесообразно применение фильтр-кеков, как основного горючего компонента КЖТ при утилизации твердых коммунальных отходов.
6. Скорости горения топливных композиций с добавлением отработанных масел в 1.5–2 раза выше чем без добавления. С ростом температуры в камере сгорания и размеров капель топлив скорости горения по экспоненциальным зависимостям увеличиваются. Введение в состав КЖТ группы типичных ТКО с относительной концентрацией не выше 20% практически не снижает значения скоростей горения. Получены аппроксимационные выражения для данных зависимостей. Показано определяющее влияние на скорости горения топливных суспензий группы факторов, таких как свойства и концентрации основных компонентов, температуры в камере сгорания и размеров капель. В случае водоугольных топлив скорости горения не зависят от размеров капель. Также скорости горения ВУТ и ОВУТ слабо меняются при изменении температуры в камере сгорания (выше 600 °C).

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ ИЗ ОТХОДОВ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

В ходе экспериментальных исследований установление некоторых зависимостей потребовало бы значительного вложения средств и времени. Поэтому для варьирования некоторых параметров в рамках диссертационной работы была использована разработанная в пакете математического моделирования «Ansys Fluent» [155]. Модель была адаптирована под задачи исследования, использовались экспериментальные данные для корректировки констант.

4.1. Описание модели

Температура частицы определялась из уравнения сохранения энергии:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = 4\varepsilon_p A_p (E_r - \sigma T_p^4) + a_{conv} A_p (T - T_p) + (1 - \chi) Q_{char} \dot{m}_{char} + \sum_{j=1}^4 \Delta \dot{m}_j h_j, \quad (4.1)$$

где m_p – масса частицы, кг; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); T_p – температура частицы, К; A_p – эффективная площадь поверхности частицы, м²; E_r – плотность потока излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\dot{m}_{char}$ – скорость окисления угля, кг/с; $\Delta \dot{m}_j$ – массовая скорость изменения j-го компонента (H₂O, O₂, C_xH_y, C); h_j – энтальпия j-го компонента (H₂O, O₂, C_xH_y, C), Дж/кг; $\varepsilon_p=0.8$, $Q_{char}=34$ МДж/кг.

Для численного моделирования турбулентного течения суспензионного топлива использовались уравнения Рейнольдса с учетом межфазного взаимодействия:

$$\nabla(\rho \mathbf{v}) = S_{pm}, \quad (4.2)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\tau_\mu + \tau_t) + S_{pv}, \quad (4.3)$$

где ρ – плотность, кг/м³; $\mathbf{v}$ – вектор скорости, м/с; p – давление, Па; τ_t – тензор рейнольдсовых напряжений; τ_μ – тензор вязких напряжений; S_{pm} – скорость изменения массы при межфазном взаимодействии; S_{pv} – скорость изменения импульса при межфазном взаимодействии.

Уравнения Рейнольдса замыкались с помощью двухпараметрической модели турбулентности – известной k – ε модели турбулентности [114]. Другие модели турбулентности, такие как k – ω , низкорейнольдсовая k – ε модель, SST-модель, $v2$ -f модель и др. отличаются более высокой степенью нелинейности и узкой направленностью на конкретные задачи по сравнению со стандартной k – ε моделью [145-146]. Поэтому в расчетах на основе этих моделей было трудно добиться сходимости, тем более в таком сложном для моделирования процессе как горение в топочной камере котельного агрегата [130, 131].

Лучистая составляющая энергии определялась из уравнения лучистой энергии [115]:

$$(a_g + a_p)E_r = \nabla \left(\frac{1}{3(a_g + a_p + \xi\gamma_p)} \nabla E_r \right) + \sigma(a_g T^4 + a_p T_p^4), \quad (4.4)$$

где ξ – коэффициент рассеяния анизотропии; γ_p – коэффициент дисперсии частиц; E_r – плотность потока излучения, α_p – коэффициент поглощения излучения частицами, α_g – коэффициент поглощения излучения газом.

Для описания движения капли использовался метод Лагранжа:

$$m_p \frac{d\bar{u}_p}{dt} = \frac{\rho_p}{2} \frac{\pi}{4} d_p^2 C_D \left(\bar{u} - \bar{u}_p \right) \left| \bar{u} - \bar{u}_p \right| + m_p \bar{g}, \quad (4.5)$$

где m_p – масса частицы, кг; μ – гидродинамическая вязкость; d_p – диаметр частицы, м; C_D – коэффициент сопротивления частиц.

Изменение массы капли топлива в процессе испарения определялось уравнением:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi d_p \left[\rho D^b \text{Sh} \ln(1 + B_m) \right], \quad (4.6)$$

где m_p – масса частицы, кг; d_p – диаметр частицы, м; ρ – плотность, кг/м³; D^b – коэффициент бинарной диффузии в несущую среду, м²/с; B_m – массовое число Сполдинга.

Теплоотдача между фазами модифицируется следующим образом:

$$\alpha_{conv} = \alpha_{conv} \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T}, \quad (4.7)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²К); B_T – коэффициент Сполдинга для теплоотдачи.

Выход летучих описывался выражением:

$$\frac{\partial m_{vol}}{\partial t} = (m_{0,vol} - m_{vol})k_{vol}, \quad (4.8)$$

где m_{vol} – масса летучих с частицы, кг; $m_{0,vol}$ – общая масса летучих в начальной частице угля, кг; k_{vol} – скорость выхода летучих веществ, с⁻¹.

Изменение диаметра частицы за счет горения описывалось уравнением [130]:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{r_{char}} k_p^c, \quad (4.9)$$

где d_p – диаметр частицы, м; k_p^c – скорость сгорания остатка, кг/(м² с); r_{char} – радиус остатка, м.

Скорость горения летучих определялась с помощью выражения [117]:

$$R_{vol} = \min(R_{KIN}, R_{EBU}), \quad (4.10)$$

где R_{EBU} – скорость реакции по модели обрыва вихря; R_{KIN} – скорость реакции по кинетической модели; R_{vol} – скорость горения реагентов (в том числе летучих).

Геометрия построенного объема основана на реально существующем котле, находящемся в поселке Барзас (Кемеровская область) [110]. В данном котле в областях А и В (рисунок 4.1а) осуществлялась подача воздуха, через область С осуществлялась подача топлива. Расчетная сетка создавалась в «Ansys Meshing» (рисунок 4.1б). Фиксирование температуры проводилось в точке 1, указанной на рисунке 4.1а. Данная точка была выбрана так как она находится в самом центре модели и определяет параметры характерные для большей части топочной камеры. Отличия параметров в большей части топочной камеры по сравнению с параметрами в точке 1 не превышает 10%. Информация о характеристиках компонентов моделируемых топлив представлена в таблицах 2.1–2.3.

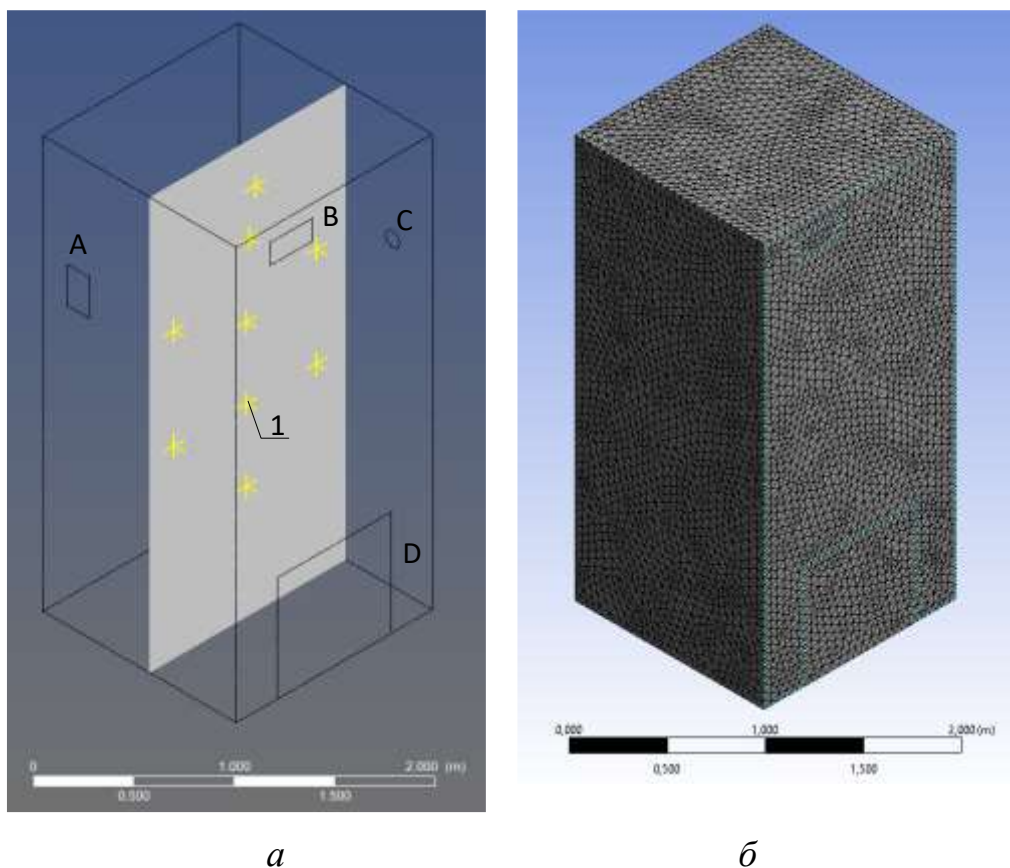


Рисунок 4.1. Схема области решения: *а* – геометрия, *б* – сетка; *A–D* – технологические отверстия; 1 – типичная контрольная точка для регистрации параметров протекающих процессов

4.2. Результаты моделирования

В рамках диссертационных исследований проведено численное моделирование для получения зависимостей температуры в камере сгорания от времени с учетом варьирования компонентного состава подаваемого топлива. Рассматривались: коксующийся уголь, ВУТ на основе кек К и ОВУТ на основе кек К и моторного масла с добавлением твердых коммунальных отходов. В качестве данных, описывающих теплофизические характеристики твердых коммунальных отходов, использованы усредненные значения для основных видов отходов. Характеристики компонентов исследуемых составов представлены в таблицах 2.1- 2.3. Для сравнения с результатами теоретических исследований использовались данные, полученные в ходе экспериментов по сжиганию ВУТ на основе кек К на реально существующем котле в поселке Барзас [110], геометрия которого была принята в качестве основной при разработке координатной сетки в модели.

Разработанная модель позволяет изучить основные характеристики процесса горения топлива в камере сгорания. На рисунке 4.2 показано поле температуры в камере сгорания при подаче ВУТ. Можно выделить рост температуры в камере сгорания при зажигании струи впрыскиваемого топлива. Остальные составы показали аналогичные по характеру распределения при рассмотрении идентичных интервалов времени. Как показали результаты исследований, наличие отработанного масла в составе ОВУТ, приводит к более раннему воспламенению и возникновению высокотемпературной области на начальном участке по сравнению с ВУТ, что ускоряет зажигание остальной впрыскиваемой массы топлива. Средние значения температуры при использовании КЖТ на основе кек К и отработанного турбинного масла с добавлением ТКО по топочной камере составили 1100–1200 °С (рисунок 4.2), для ВУТ – 1000–1050 °С. Более высокие температуры для первого обусловлены наличием горючей компоненты (в количестве 10%) с высокой теплотой сгорания (44 МДж/кг), а также более интенсивным (скорости выше, чем у углерода) выгоранием данного топлива.

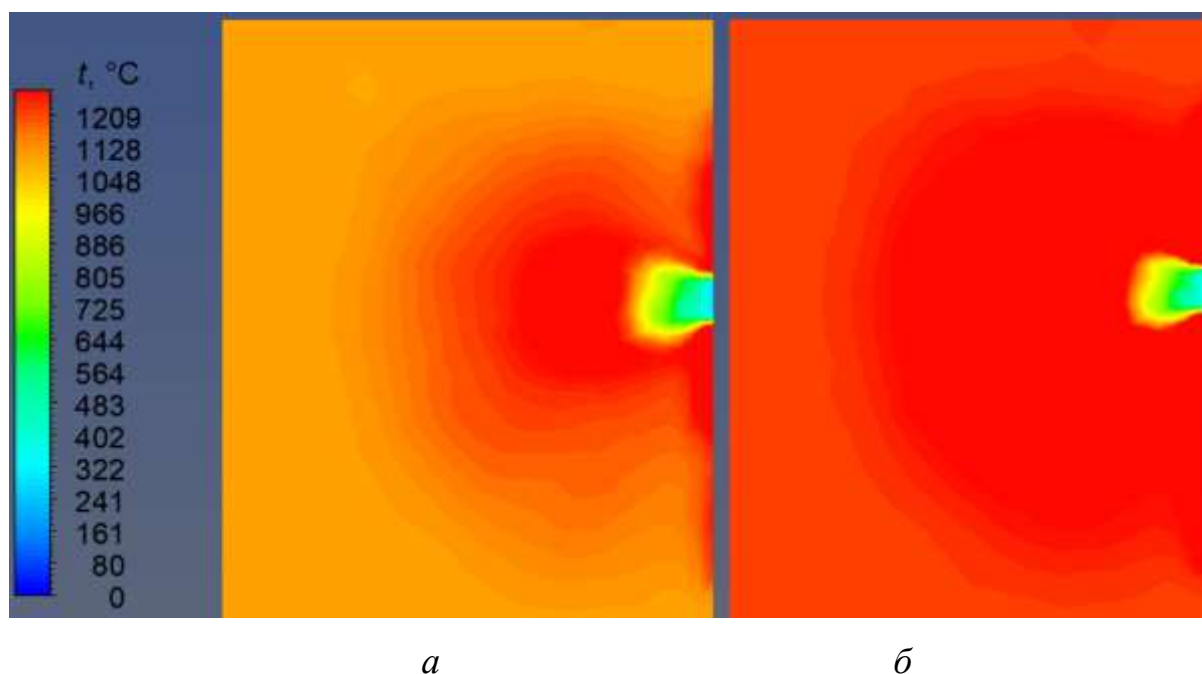


Рисунок 4.2. Поле температуры в камере сгорания при подаче ВУТ: *а* – $\tau=20$ мин, *б* – $\tau=50$ мин.

На рисунке 4.3 представлены зависимости температуры в камере сгорания от времени в ходе горения моделируемых топлив в характерной точке 1. Результаты моделирования процесса горения ВУТ хорошо согласуются с экспериментальными данными [110]. Сравнение данных показывает, что максимальные отличия наибольшей температуры горения для состава ОВУТ с добавлением ТКО не превышают 10%. Близость полученных результатов с экспериментальными данными указывает на хорошую адекватность разработанной модели.

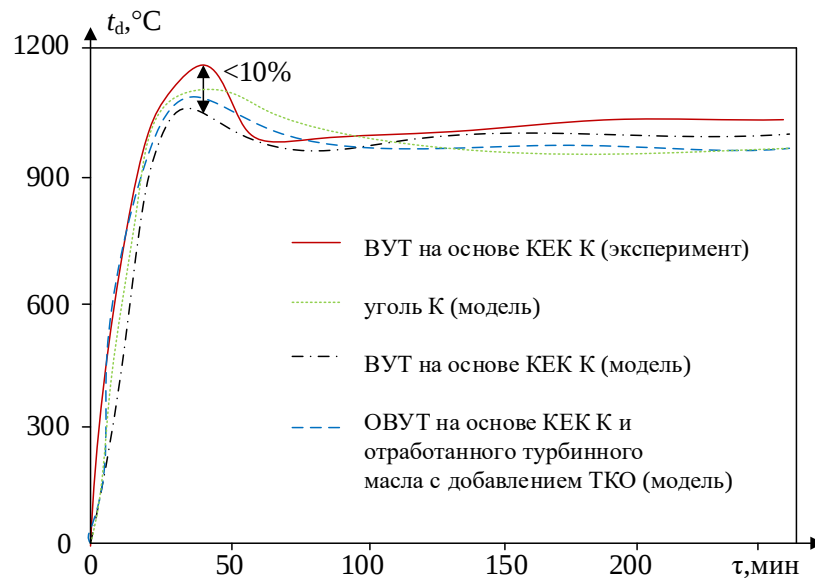


Рисунок 4.3. Температуры в камере сгорания, как функции времени в ходе горения моделируемых топлив в контрольной точке №1 ($t_g=900^\circ\text{C}$). Дополнительно приведены данные экспериментов [110]

Разработанная модель позволяет получить результаты таких экспериментов, которые на реальной установке провести невозможно или требуется большое количество времени и денежных средств. К таким экспериментам относится нахождение оптимального расхода воздуха и топлива, а также оптимальной концентрации добавленного ТКО в составе ВУТ или ОВУТ. Кроме того, представляет интерес влияние на характеристики горения тонины помола, коэффициента избытка воздуха, выбор режима подачи топлива. Также важны концентрации SO_x (а) и NO_x (б) в продуктах сгорания при различных условиях. Ниже представлены результаты

проведенных расчетов по изучению влияния данных факторов на распределения температуры в камере сгорания.

На температуру горения в камере сгорания влияют, прежде всего, отношение расходов воздуха и топлива. На рисунке 4.4 представлены зависимости максимальных температур горения в контрольной точке № 1 при варьировании расхода воздуха в топке. При сжигании твердых коммунальных отходов в составе композиционного топлива с одинаковым соотношением ТКО и кека максимальные температуры становятся выше. Если же в состав композиционного топлива добавить небольшое количество горючей жидкости (например, отработанное турбинное масло), то максимальные температуры горения будут сопоставимы с температурами горения использующихся в настоящее время в камерах сгорания типичных углей, так как добавление масла сильно интенсифицирует процесс горения композиционного топлива.

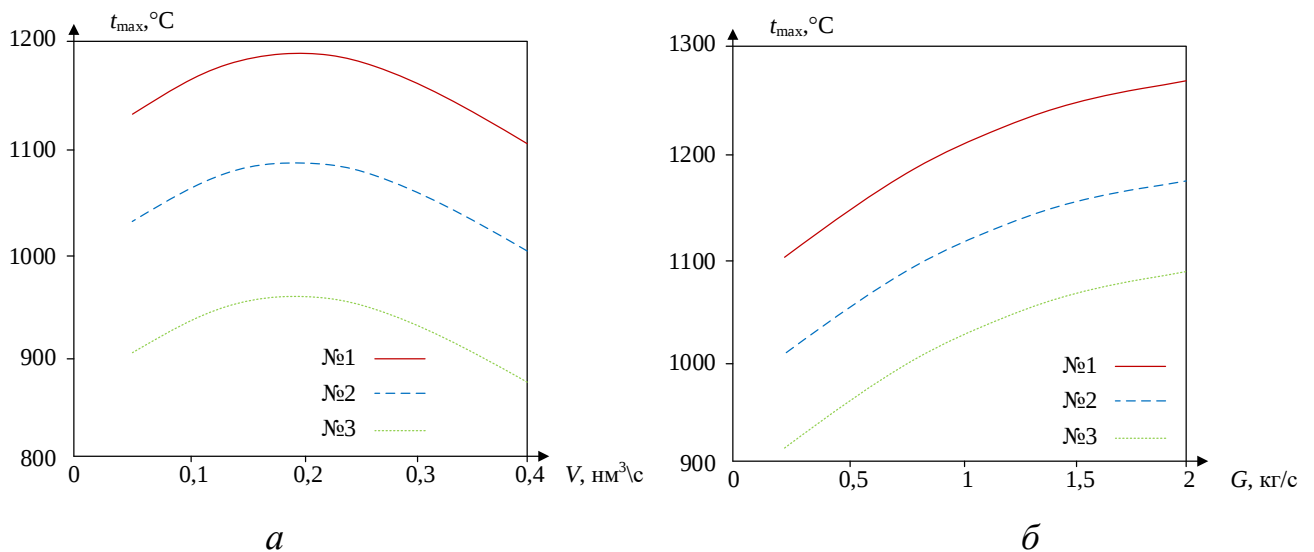


Рисунок 4.4. Зависимости максимальных температур горения в контрольной точке №1 от расхода воздуха (*a*) и расхода топлива (*б*) в камеру сгорания для различных составов топлива (№1 – кек 70 %, ТКО 20 % (резина), турбинное масло 10%; №2 – кек 50 %, ТКО 50 % (резина), турбинное масло 10%, №3 – ТКО 100% (резина)) ($t_g=900^\circ\text{C}$)

На рисунке 4.4*a* видно, что оптимальный расход воздуха составляет около $0.23 \text{ nm}^3/\text{с}$. При увеличении расхода растет недожог, что приводит к небольшому

снижению максимальной температуры. При уменьшении расхода подаваемого воздуха концентрации окислителя становится недостаточно для химического реагирования. Соответственно, значения температуры в камере сгорания снижаются. На рисунке 4.4б видно, что достаточным для достижения рабочей температуры котла в 1200 °С является расход топлива в 0.1 кг/с. При увеличении данного расхода можно повысить максимальную температуру, но это не является экономически целесообразным. При уменьшении расхода объем подаваемого топлива становится недостаточным для достижения требуемой температуры.

Проведенные численные исследования позволили определить влияние концентрации твердых коммунальных отходов в составе топлива на характеристики процесса горения. На рисунке 4.5 представлены зависимости максимальных температур горения в контрольной точке № 1 при варьировании концентрации основных твердых коммунальных отходов, включенных в композитное топливо.

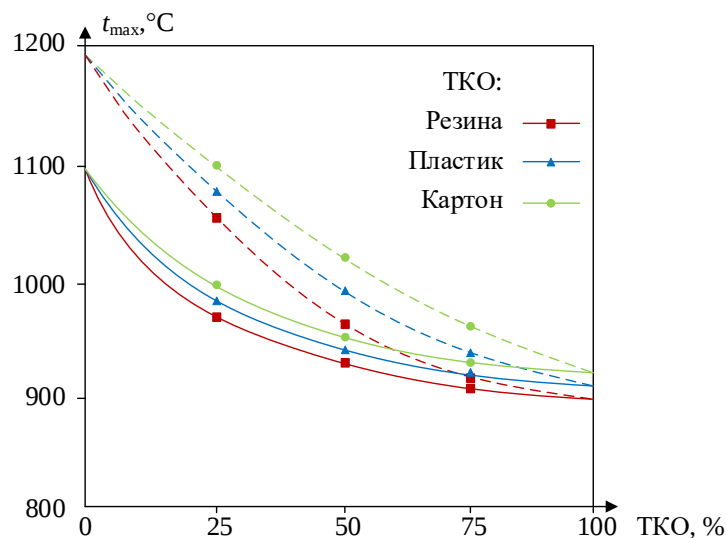


Рисунок 4.5. Зависимости максимальных температур горения в контрольной точке № 1 от концентрации ТКО включенного в КЖТ для составов топлив, содержащих разные виды ТКО (сплошная линия – кек 90 %, ТКО 10 %; пунктирная линия – кек 70 %, ТКО 20 %, турбинное масло 10 %) ($t_g=900^{\circ}\text{C}$)

Видно, что увеличение концентрации твердых коммунальных отходов в КЖТ снижает максимально достижимую температуру в камере сгорания. Уже при относительной концентрации ТКО около 25% исследуемые составы ВУТ не позволяют

достичь рабочей температуры в камере сгорания, которая достигается при горении угля. Поэтому увеличение концентрации ТКО выше 25 % приведет к неэффективному (с повышенным недожогом) горению топлива. Преимущество ОВУТ состоит в том, что максимальную температуру можно повысить за счет добавления в состав суспензий жидкого горючего компонента, например, турбинного масла.

Помимо максимальной температуры имеют значение концентрации NO_x и SO_x в продуктах сгорания топлива. На рисунке 4.6 представлены зависимости максимальных концентраций NO_x и SO_x в продуктах сгорания от концентрации ТКО в составе композиционного топлива при различной температуре в камере сгорания (при подаче топлива в отверстие 1 на рисунке 4.1).

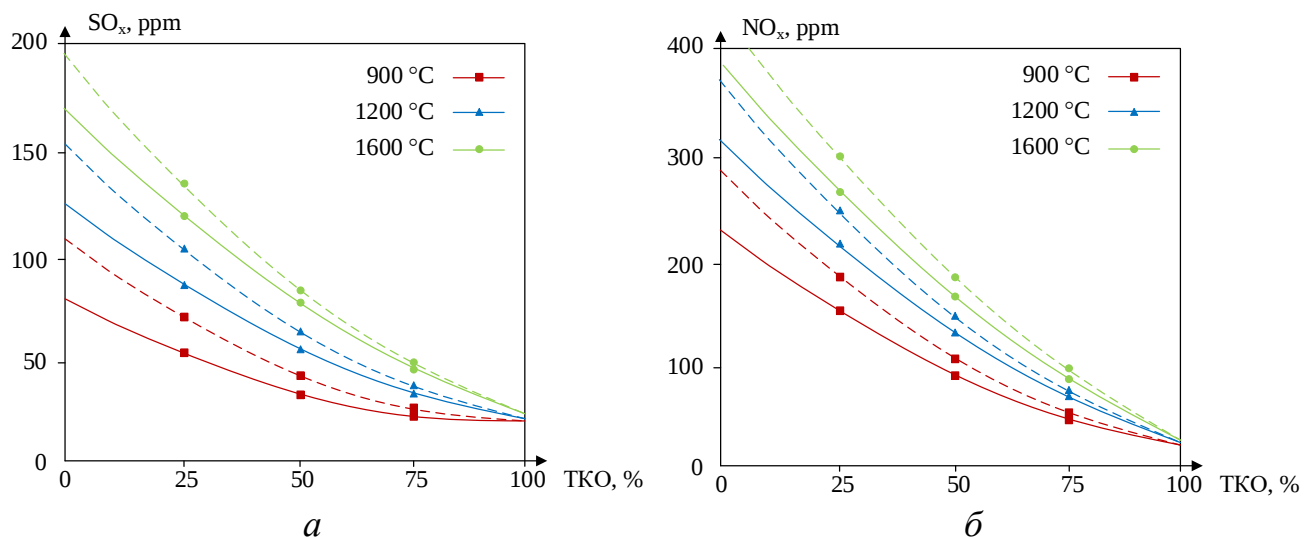


Рисунок 4.6. Зависимости концентрации SO_x (а) и NO_x (б) в продуктах сгорания композиционного топлива в контрольной точке №1 от концентрации ТКО в КЖТ при различной температуре в камере сгорания (сплошная линия – кек 90 %, ТКО 10 % (резина); пунктирная линия – кек 70 %, ТКО (резина) 20 %, турбинное масло 10 %).

Видно, что максимальные концентрации NO_x и SO_x достигаются при сжигании кека без добавления твердых коммунальных отходов, а увеличение температуры в камере сгорания приводит к увеличению концентраций NO_x и SO_x . Так же видно, что использование ОВУТ, по сравнению с ВУТ, показывает большие кон-

центрации NO_x и SO_x . Так как содержание азота и серы в типичных твердых коммунальных отходах меньше, чем в исходном кеке, то в результате добавления твердых коммунальных отходов массовая концентрация кека снижается за счет добавления твердого горючего компонента, в котором меньше серы и азота. Поэтому в продуктах сгорания уменьшается концентрация NO_x и SO_x . Положительным эффектом по снижению концентраций NO_x и SO_x является то, что продукты разложения воды и монооксид углерода вступают в химическое реагирование с оксидами азота и серы и образуют соли, которые остаются в золе.

Степень измельчения твердых коммунальных отходов также является важной характеристикой, влияющей на эффективность горения топлива в камере сгорания. На рисунке 4.7а представлены зависимости максимальных температур горения в контрольной точке № 1 от концентрации ТКО включенного в КЖТ для топлив с различной тониной помола ТКО. Установлено, что уменьшение тонины помола ТКО в КЖТ увеличивает максимально достижимую температуру в камере сгорания. Это связано с ростом площади теплообмена и повышением полноты выгорания топлива. Но выполненный анализ показал, что с ростом концентраций топливных добавок из числа твердых коммунальных отходов и повышением температуры роль фактора тонины помола ослабевает. Уменьшение тонины помола в реальности сопряжено со значительным увеличением времени работы измельчающего оборудования, а также удорожанием стоимости. Следовательно, исходя из полученных зависимостей, тонина помола до 100 мкс для составов ОБУТ с ТКО может быть оптимальной.

На максимальную температуру горения в камере сгорания влияет коэффициент избытка воздуха. На рисунке 4.7б представлены зависимости максимальных температур горения в отверстии 1 от концентрации ТКО включенного в КЖТ с различным коэффициентом избытка воздуха в камере сгорания. Из графика видно, что повышение коэффициента ведет к более полному сгоранию топлива и повышению максимальной температуры, однако повышение выше $\alpha=1.3$ уже не имеет сильного эффекта.

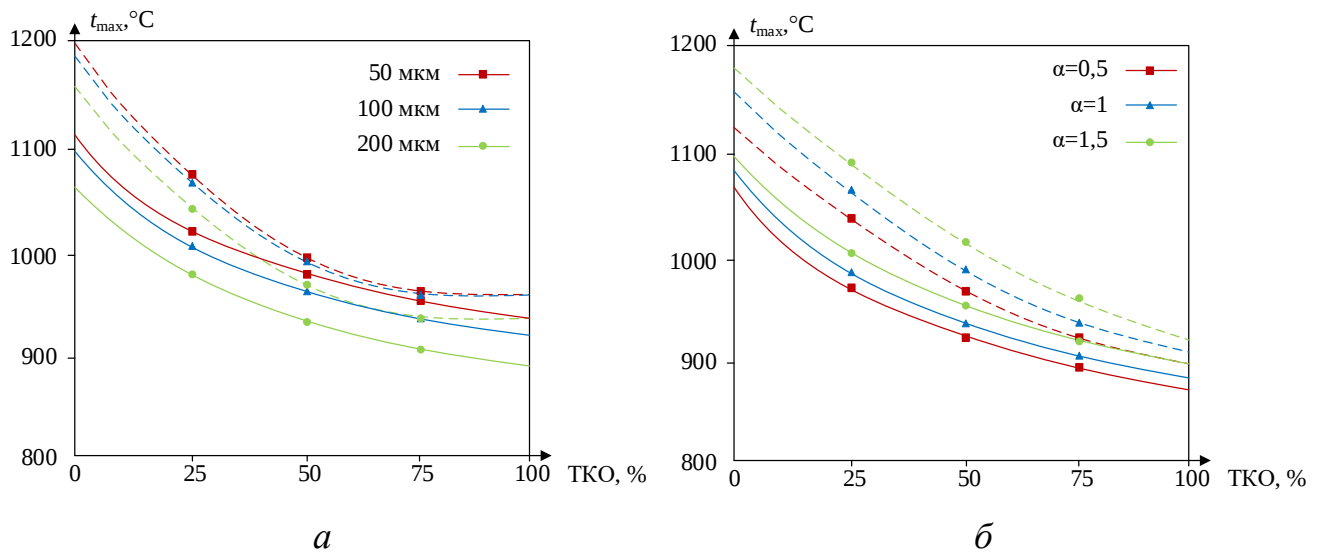


Рисунок 4.7. Зависимости максимальных температур горения в контрольной точке № 1 от концентрации ТКО включенного в КЖТ для составов топлив, с различной тониной помола ТКО (а), а также с различным коэффициентом избытка воздуха (б) (сплошная линия – кек 90 %, ТКО 10 %; пунктирная линия – кек 70 %, ТКО 20 %, турбинное масло 10 %) ($t_g=900^\circ\text{C}$)

На распределение температуры в камере сгорания в ходе подачи топлива также влияет способ его впрыска. В случае топливных суспензий основной способ подачи топлива состоит во впрыске в камеру сгорания. Подача может осуществляться под определенным углом для увеличения длины траектории полета капель и частиц топлива с целью повышения полноты его выгорания. На рисунке 4.8 представлены изолинии температур в ходе подачи топлива в камеру сгорания при различном угле – на примере 45° и 90° . В данном случае благодаря размерам камеры сгорания угол подачи не играет сильной роли в изменении формирования температурного поля внутри камеры сгорания. Проведенные численные исследования показали, что чем выше инерционность зажигания топлива, тем длиннее траекторию полета капель и частиц целесообразно предусмотреть в топочной камере. Это можно сделать за счет выбора определенного угла наклона форсунок. Но данные процедуры целесообразно проводить только при относительно небольших температурах в камере сгорания (до 1200°C). При больших температурах вследствие

ограничений размеров камер можно предпринимать попытки снижения расхода топлива для стабильно высокой температуры и полноты выгорания.

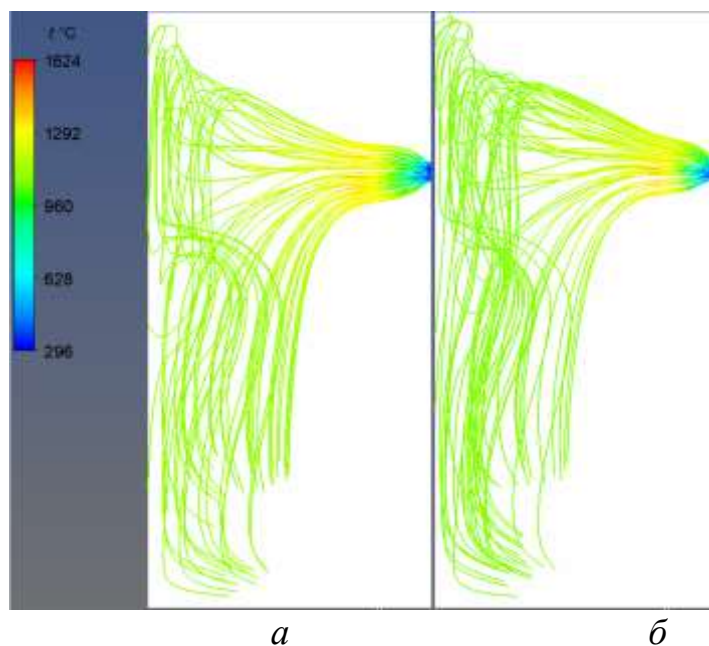


Рисунок 4.8. Изолинии температур в ходе подачи топлива в камеру сгорания при различном способе подачи: *a* – подача под углом 90° , *б* – подача под углом 45°

Известно, что развитие любой теории происходит по мере накопления и осмысления новых экспериментальных данных о физике и характеристиках процессов, описываемых этой теорией. Как следствие, необходимо отметить следующее. В течение последних 30–40 лет достаточно интенсивно развивается теория зажигания и горения КЖТ. Развитие данной теории сдерживается в значительной степени отсутствием информации о дифференциальных характеристиках процессов горения (в первую очередь, температуры в топочных камерах). Регистрация в экспериментах температуры в определенных точках среды, безусловно, является полезной для тестирования и верификации физических и математических моделей процессов тепломассопереноса и интенсивных фазовых превращений в топочных камерах. Соответственно, становится возможным совершенствование и развитие моделей горения композиционных топлив. В диссертационной работе приведена такая модель, с применением которой можно прогнозировать эффективные условия сжигания КЖТ на основе различных компонентов.

Выводы по четвертой главе

1. Приведена адекватная для условий проведенных экспериментов математическая модель горения композиционного топлива в камере сгорания. Геометрия модели основана на реально существующем котле [110]. Проведено сравнение результатов, полученных на модели и с помощью экспериментов. Расхождение составляет не более 10%.
2. Представленная модель сжигания КЖТ может использоваться для прогнозирования интегральных характеристик горения составов с варьируемыми характеристиками в широких диапазонах. С ее использованием можно прогнозировать перспективы применения КЖТ с твердыми коммунальными отходами и другими отходами в топочных камерах котельных установок.
3. На разработанной модели проведено варьирование некоторых параметров с целью нахождения оптимальных условий горения. Повышение концентрации твердых коммунальных отходов от 0 до 50 % в составе КЖТ приводит к снижению температуры в топочной камере с 1200 °С до 900 °С. Концентрации антропогенных выбросов SO_x и NO_x так же снижаются до 70 и 200 ppm, соответственно, благодаря образованию солей в золе, а также уменьшению азота и серы в исходном топливе. Однако увеличение концентрации твердых коммунальных отходов уже выше 20% нецелесообразно из-за уменьшения температуры в области горения ниже 1000 °С.
4. Оптимальный температурный диапазон сжигания КЖТ с добавлением твердых коммунальных отходов составил от 1000°С до 1200 °С. Концентрации NO_x и SO_x в таких условиях находились в пределах от 155 до 75 ppm и от 380 до 230 ppm соответственно.
5. Проведены расчеты по нахождению оптимального расхода воздуха, расхода топлива, оптимальной тонины помола ТКО, а также оптимальной концентрации добавленного в композиционное топливо ТКО. Определено что для исследуемого котла заданной геометрии оптимальным расходом воздуха является 0.25 м³/с, а оптимальным расходом топлива является 0.09 кг/с.

ГЛАВА 5. СОВМЕСТНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ КОММУНАЛЬНЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ С ВЫРАБОТКОЙ ЭНЕРГИИ

5.1. Перспективы совместной утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой энергии в Сибири

Как правило, для большинства стран с развитым сырьевым сектором экономики (в первую очередь, из-за добычи полезных ископаемых) характерна тенденция, когда регионы, в которых ведется добыча полезных ископаемых, окружают другие регионы с высоким уровнем промышленного и социального развития (рисунки 5.1.1). Такое соседство создает благоприятные условия, с одной стороны, для увеличения объемов добычи полезных ископаемых, с другой стороны, для развития промышленных предприятий и, соответственно, увеличения численности населения [101].

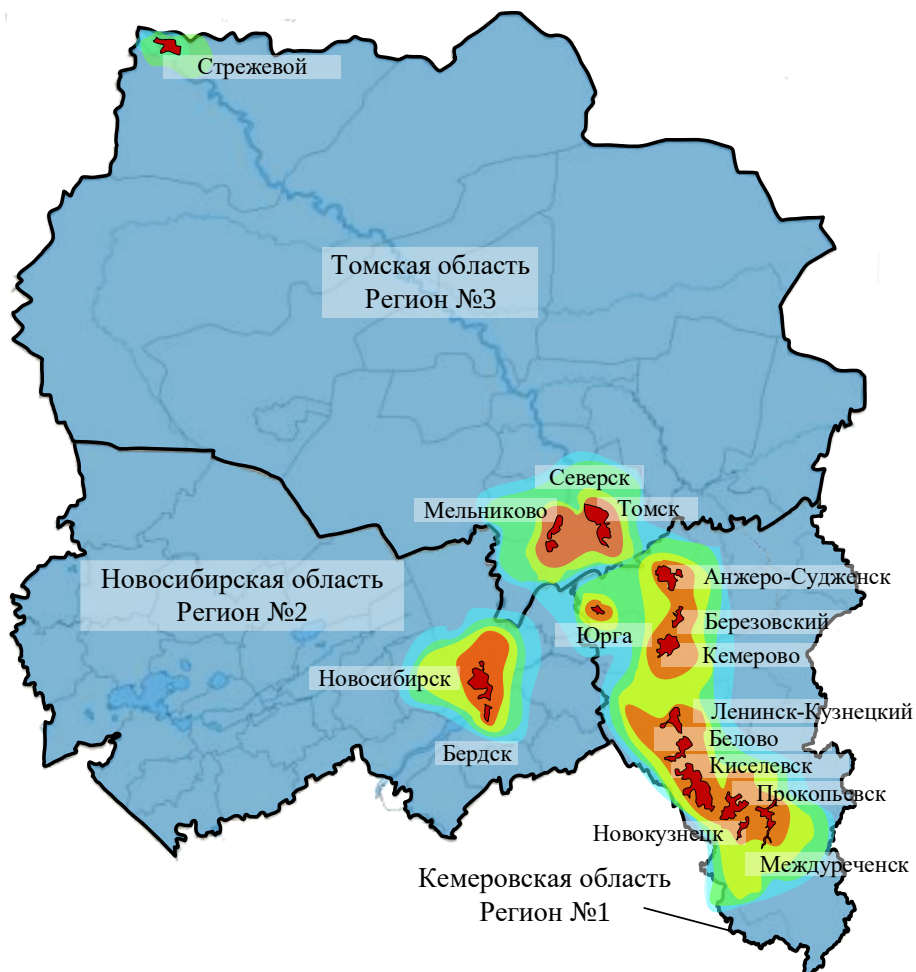


Рисунок 5.1.1. Основные источники образования промышленных отходов и ТКО в Кемеровской, Новосибирской и Томской областях [101]

В таких условиях для регионов с развитым сырьевым сектором экономики, например, за счет добычи и экспорта угля, одной из основных проблем является снижение негативного воздействия углеобогачительных фабрик за счет складирования фильтр-кека на открытых полигонах на окружающую среду. Для регионов с высоким уровнем промышленного и социального развития одной из основных проблем является переработка и утилизация твердых коммунальных отходов, ежегодный объем производства которых сопоставим по масштабам с объемом (миллионы тонн в год) промышленных отходов крупных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.

Для комплексного решения этих проблем перспективным направлением является реализация соседними регионами стратегии совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов путем сжигания в составе композиционных топлив на местных тепловых электрических станциях и котельных. С одной стороны, при этом произойдет снижение негативного воздействия отходов на окружающую среду, с другой стороны, произойдет снижение объема потребления угольного топлива высокого качества. В диссертационной работе предлагается стратегия, основные положения которой разработаны на примере трех соседних регионов Российской Федерации, расположенных на территории Западной Сибири: Кемеровская область (регион № 1), Новосибирская область (регион № 2), Томская область (регион № 3). Полученные результаты будут являться основой для разработки аналогичных стратегий по утилизации отходов в других регионах мира с учетом их особенностей (количество и структура отходов).

5.1.1. Описание объектов сравнительного анализа

В Кемеровской области (регион № 1) ежегодно производится $2801 \cdot 10^6$ тонн отходов, из которых на долю твердых коммунальных отходов приходится $0.9 \cdot 10^6$ тонн. Всего на территории региона расположено 173159 источников ТКО, 139 источников отходов добычи полезных ископаемых, 538 источников отходов обрабатывающей промышленности, 1517 источников производственных и непроизводственных отходов (материалы, изделия, утратившие потребительские свойства),

497 источников отходов обеспечения электроэнергией, газом и паром, 294 источников отходов водоснабжения и водоотведения, 176 источников отходов строительства и ремонта, 72 источника отходов сельского хозяйства, лесного хозяйства, рыбоводства и рыболовства, 1073 источника прочих отходов [81]. Структура твердых коммунальных отходов приведена на рисунке 5.1.2.

Из общего количества твердых коммунальных отходов около 98% подвергается складированию и захоронению на полигонах, лишь около 2% утилизируется [81]. Особенности Кемеровской области являются: плотность населения составляет около 28 человека на 1 кв. км, 85% которого сосредоточено в городской местности. Общая численность населения региона составляет около 2.7 млн человек. В каждом из пяти крупных городов (Кемерово, Новокузнецк, Прокопьевск, Белово, Междуреченск) проживает более 100 тыс. жителей. Поэтому более 80% ТКО образуется в крупных городах [81].

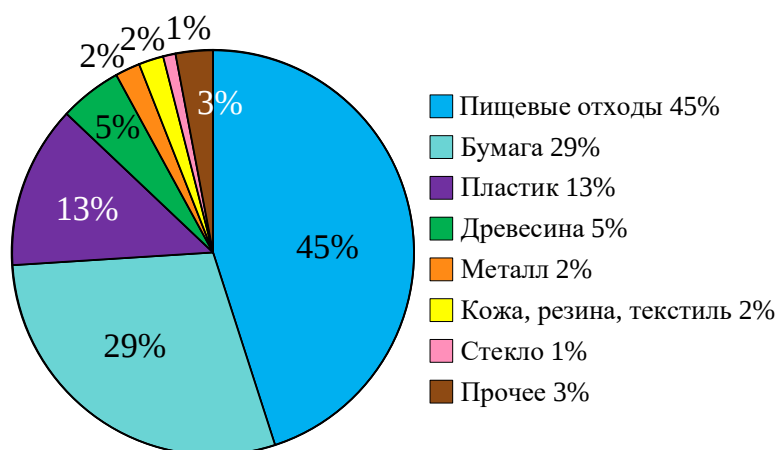


Рисунок 5.1.2. Структура ТКО Кемеровской области (регион № 1) [101]

На территории Кемеровской области расположены месторождения огромного количества полезных ископаемых. В промышленных масштабах ведется преимущественно добыча угля (бурого и каменного). Этот уголь используется не только для нужд теплоэнергетики внутри страны, но и экспортируется за рубеж [81]. Поэтому основными источниками горючих промышленных отходов являются угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия. Наибольшее количество отходов (фильтр-кеков) образуется в местах расположения крупных угольных разрезов в окрестностях г. Кемерово (39%), а также разрезов «Междуреченский» (12.4%),

«Киселевский» (9%), «Березовский» (8.6%), «Прокопьевский» (7.5%) [81].

В Новосибирской области (регион № 2) ежегодно производится $3.9 \cdot 10^6$ тонн отходов, из которых $1.3 \cdot 10^6$ тонн являются ТКО. Основное количество ТКО ($1.2 \cdot 10^6$ тонн – 92.3%) образуется на территории регионального центра (г. Новосибирск) и в его окрестностях (г. Бердск) [82]. Это объясняется тем, что 2.2 млн из 2.8 млн жителей проживают в этой местности. Около 78% ТКО направляется на захоронение. Только третья часть полигонов ТКО отвечает нормативным требованиям безопасности. Количество ТКО, размещаемых на полигонах, ежегодно возрастает. В окрестностях регионального центра (г. Новосибирск) за последние 15 лет количество отходов, расположенных на полигонах, выросло в 2.5 раза и составляет около $70 \cdot 10^6$ тонн [82]. Структура ТКО приведена на рисунке 5.1.3.

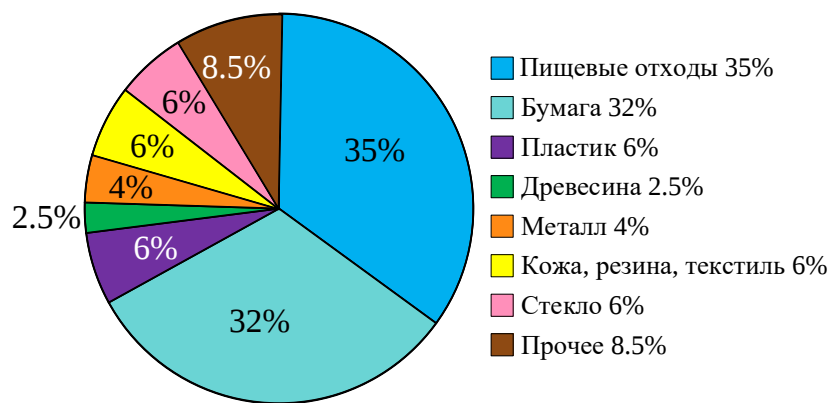


Рисунок 5.1.3. Структура ТКО Новосибирской области (регион № 2) [101]

В Новосибирской области производится выпуск большого количества продукции: сельскохозяйственные продукты, пищевые продукты, электрооборудование, электронное и оптическое оборудование, металлургическое оборудование, металлические и неметаллические изделия, строительные материалы (железобетон). В Новосибирской области ежегодно производится $2.6 \cdot 10^6$ тонн промышленных отходов, из которых наибольшую часть (43.8%) составляют отходы добычи полезных ископаемых, в частности угля [82].

В Томской области (регион № 3) ежегодно производится около $1.3 \cdot 10^6$ тонн отходов, из них $0.4 \cdot 10^6$ тонн ТКО и $0.9 \cdot 10^6$ тонн промышленных отходов [83]. Основное количество ТКО образуется в местах расположения крупных городов:

Томск ($0.3 \cdot 10^6$ тонн – 74.7%), г. Северск ($0.03 \cdot 10^6$ тонн – 7.5%). Это объясняется тем, что 0.8 млн из 1.1 млн жителей проживает в этой местности. Около 98% ТКО направляется на захоронение на специализированные полигоны [83]. Структура ТКО приведена на рисунке 5.1.4.

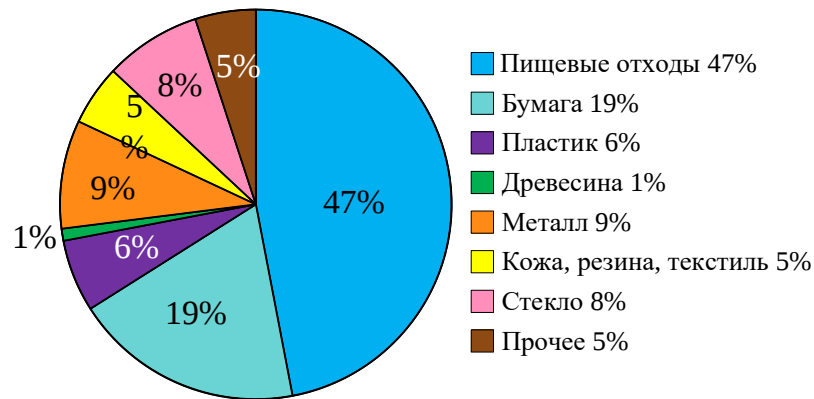


Рисунок 5.1.4. Структура ТКО Томской области (регион № 3) [101]

Основное количество промышленных отходов образуется в местах расположения крупных промышленных объектов: г. Томск ($0.3 \cdot 10^6$ тонн – 26.8%), г. Северск ($0.3 \cdot 10^6$ тонн – 24.3%), и в окрестностях этих городов ($0.1 \cdot 10^6$ тонн – 12.3%) [83]. На территории Томской области расположено около 3500 промышленных предприятий [83]. Структура промышленного производства является многоотраслевой. Основные отрасли промышленности: деревообрабатывающая, пищевая, лесная, машиностроение и металлообработка, топливная, цветная металлургия, электроэнергетика, химическая и нефтехимическая промышленности. Доминирующее положение (более 60% от общего объема промышленного производства) занимают нефтяная и нефтехимическая промышленности, машиностроение и металлообработки. Из общего количества ежегодно производимых отходов ($0.9 \cdot 10^6$ тонн) $0.2 \cdot 10^6$ тонн повторно используется на предприятиях, $0.2 \cdot 10^6$ тонн передается сторонним организациям в качестве вторичных ресурсов, $0.5 \cdot 10^6$ тонн располагается на территории предприятий на временных хранилищах или захоранивается на специализированных полигонах [83].

5.1.2. Энергетический потенциал промышленных отходов и ТКО

В таблицах 5.1.1–5.1.3 приведены основные данные, которые используются при расчетах энергетического потенциала промышленных отходов и ТКО в трех соседних регионах (рисунок 5.1.1), расположенных на территории Российской Федерации. Исходные данные для расчета энергетического потенциала ТКО приведены в [78–85].

К 2020 году уже накоплено и не утилизировано (хранится на полигонах) (величина G^0_{MSW}) ТКО [81-83]:

- в Томской области – $21.0 \cdot 10^6$ тонн;
- в Новосибирской области – $70.0 \cdot 10^6$ тонн;
- в Кемеровской области – $54.0 \cdot 10^6$ тонн.

Ежегодный объем производства ТКО (величина G_{MSW}):

- в Томской области – $0.4 \cdot 10^6$ тонн;
- в Новосибирской области – $1.3 \cdot 10^6$ тонн;
- в Кемеровской области – $0.9 \cdot 10^6$ тонн.

Для каждого региона доля переработанных горючих ТКО, складываемых на полигонах (коэффициент k^{MSW}):

- в Томской области – 0.6;
- в Новосибирской области – 0.7;
- в Кемеровской области – 0.5.

Для типичного состава ТКО каждого региона усредненная теплота сгорания (величина q^{MSW}) составляет (таблица 5.1.3):

- в Томской области – 10.0 МДж/кг;
- в Новосибирской области – 12.0 МДж/кг;
- в Кемеровской области – 14.1 МДж/кг.

Энергетический потенциал от сжигания накопленных ТКО в каждом регионе до 2020 года:

$$Q^0_{\text{MSW}} = G^0_{\text{MSW}} \cdot q^{\text{MSW}} \quad (5.1)$$

- в Томской области $Q_{MSW}^0 = 21.0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 10.0 \cdot 10^6 = 20.9 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{MSW}^0 = 70.0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 12.0 \cdot 10^6 = 83 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Кемеровской области $Q_{MSW}^0 = 54.0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 14.1 \cdot 10^6 = 76.1 \cdot 10^{16}$ Дж.

Таблица 5.1.1. Характеристики отходов по регионам

Характеристика	Кемеровская обл. (регион № 1)	Новосибирская обл. (регион № 2)	Томская обл. (регион № 3)
Общее количество отходов, тонн/год	$2801 \cdot 10^6$	$3.9 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$
Промышленные отходы, тонн/год	$2800 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^6$	$0.9 \cdot 10^6$
Структура пром. отходов [78-80]:			
• отходы добычи по- лезных ископаемых	99.5%	43.8%	17.2%
• отходы обрабаты- вающей промышленно- сти	0.2%	8.1%	32.8%
• отходы при произ- водстве и распреде- лении электроэнер- гии, газа и воды	0.1%	24.5%	7.2%
• отходы строитель- ства и ремонта	<0.01%	0.1%	1.0%
• отходы сельского, лесного хозяйства, рыбоводства	0.04%	16.0%	32.9%
• прочие отходы	0.15%	7.5%	8.9%

Таблица 5.1.1. Характеристики отходов по регионам (продолжение)

Характеристика	Кемеровская обл. (регион № 1)	Новосибирская обл. (регион № 2)	Томская обл. (регион № 3)
Повторное использование / утилизация, тонн/год [81-83]	$1876.0 \cdot 10^6$ (67.0%)	$0.9 \cdot 10^6$ (34.1%)	$0.3 \cdot 10^6$ (28.0%)
Захоронение / складирование на полигонах, тонн/год	$924.0 \cdot 10^6$ (33.0%)	$1.7 \cdot 10^6$ (65.9%)	$0.6 \cdot 10^6$ (72.0%)
ТКО, тонн / год	$0.9 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^6$	$0.4 \cdot 10^6$
Структура ТКО [78-84]:			
· пищевые отходы	45%	35%	47%
· бумага	29%	32%	19%
· пластик	13%	6%	6%
· металл	2%	4%	9%
· стекло	1%	6%	8%
· древесина	5%	2.5%	1%
· прочее	3%	8.5%	5%
Повторное использование / утилизация, тонн/год [81-83]	$0.02 \cdot 10^6$ (1.9%)	$0.3 \cdot 10^6$ (22%)	$0.008 \cdot 10^6$ (2.0%)
Захоронение / складирование на полигонах, тонн/год	$0.88 \cdot 10^6$ (98.1%)	$1.0 \cdot 10^6$ (78%)	$0.392 \cdot 10^6$ (98.0%)

Энергетический потенциал от сжигания ТКО, накапливаемых в течение одного года:

$$Q^{\text{MSW}} = k^{\text{MSW}} \cdot G^{\text{MSW}} \cdot q^{\text{MSW}} \quad (5.2)$$

- в Томской области $Q^{MSW}=0.6 \cdot 0.4 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 10.0 \cdot 10^6 = 0.2 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской обл. $Q^{MSW}=0.7 \cdot 1.3 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 12.0 \cdot 10^6 = 1.5 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Кемеровской области $Q^{MSW}=0.5 \cdot 0.9 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 14.1 \cdot 10^6 = 1.3 \cdot 10^{16}$ Дж.

Таблица 5.1.2. Количество сточных вод, образующихся при переработке нефти (в расчете на 1 т нефти) [86]

Тип завода	Количество производственных сточных вод, м ³ /т нефти	
	первой системы	второй системы
Нефтеперерабатывающий завод топливного профиля	0.23–0.25	0.10–0.20
Нефтеперерабатывающий завод топливно-масляного профиля	0.40–1.50	0.10–0.25
Нефтехимический завод	2.00–3.00	1.20–2.00

Таблица 5.1.3. Теплота сгорания типичных ТКО [87]

Наименование	Теплота сгорания, Дж/кг ($\times 10^6$)
Пищевые отходы	5–10
Бумага	15–20
Пластик	20–25
Кожа, резина, текстиль	20–35
Дерево	15–20
Прочее	<10

5.1.3. Энергетический потенциал отходов обогащения угля и нефтепереработки

Исходные данные для расчета энергетического потенциала фильтр-кеков и низкосортных углей [80]. В таблице 5.1.4 указано сколько в каждом регионе к 2020 году уже накоплено и не утилизировано (хранится на полигонах) фильтр-кека (величина G_{fc}^0):

- в Томской области не ведется добыча и обогащение угля;

- в Новосибирской области – $5.8 \cdot 10^6$ тонн;
- в Кемеровской области – $368.6 \cdot 10^6$ тонн.

Ежегодный объем производства фильтр-кека (величина G_{fc}) составляет 10–15% от объема обогащаемого угля:

- в Томской области не ведется добыча и обогащение угля;
- в Новосибирской области – $0.4 \cdot 10^6$ тонн;
- в Кемеровской области – $8.1 \cdot 10^6$ тонн.

Для типичного фильтр-кека теплота сгорания (таблица 2.1) составляет около $24.8 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{fc}).

Энергия от сжигания накопленных фильтр-кеков до 2020 года:

$$Q_{fc}^0 = G_{fc}^0 \cdot q_{fc} \quad (5.3)$$

- в Томской области $Q_{fc}^0 = 0$ Дж;
- в Новосибирской обл. $Q_{fc}^0 = 5.8 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24.8 \cdot 10^6 \cdot 0.6 = 8.6 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Кемеровской обл. $Q_{fc}^0 = 368.6 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24.8 \cdot 10^6 \cdot 0.6 = 548.5 \cdot 10^{16}$ Дж.

Энергетический потенциал от сжигания фильтр-кеков, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{fc} = G_{fc} \cdot q_{fc} \quad (5.4)$$

- в Томской области $Q_{fc} = 0$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{fc} = 0.4 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24.8 \cdot 10^6 \cdot 0.6 = 1.0 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Кемеровской области $Q_{fc} = 8.1 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24.8 \cdot 10^6 \cdot 0.6 = 20.1 \cdot 10^{16}$ Дж.

Исходные данные для расчета энергетического потенциала жидких горючих отходов (отработанные масла) [45,88,89].

В каждом регионе к 2020 году уже накоплено и не утилизировано, а хранится на полигонах (величина G_{oil}^0) отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки:

- в Томской области – $2219.4 \cdot 10^3$ тонн;
- в Новосибирской области – $97.3 \cdot 10^3$ тонн;
- в Кемеровской области нет запасов жидких горючих отходов.

Ежегодный объем производства отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки (величина G_{oil}):

- в Томской области – $11.5 \cdot 10^3$ тонн;
- в Новосибирской области – $0.7 \cdot 10^3$ тонн;
- в Кемеровской области – $0.5 \cdot 10^3$ тонн.

Таблица 5.1.4. Энергетический потенциал каждого региона за счет накопленных и ежегодно производимых отходов

Энергоресурсы	Суммарно накоплено		Ежегодный прирост	
	G^0 , тонн	Q^0 , Дж	G , тонн	Q , Дж
Кемеровская область (регион № 1)				
Фильтр-кек	$368.8 \cdot 10^6$	$548.5 \cdot 10^{16}$	$8.1 \cdot 10^6$	$12.1 \cdot 10^{16}$
ТКО	$54.0 \cdot 10^6$	$76.1 \cdot 10^{16}$	$0.9 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	—	—	$0.5 \cdot 10^3$	$0.9 \cdot 10^{13}$
Новосибирская область (регион № 2)				
Фильтр-кек	$5.8 \cdot 10^6$	$8.6 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^6$	$0.6 \cdot 10^{16}$
ТКО	$70.0 \cdot 10^6$	$83.0 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$97.3 \cdot 10^3$	$0.4 \cdot 10^{16}$	$0.7 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^{13}$
Томская область (регион № 3)				
Фильтр-кек	—	—	—	—
ТКО	$21 \cdot 10^6$	$20.9 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^6$	$0.2 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$2.2 \cdot 10^6$	$9.8 \cdot 10^{16}$	$11.5 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^{16}$
Общие данные для трех регионов				
Фильтр-кек	$374.6 \cdot 10^6$	$557.1 \cdot 10^{16}$	$8.5 \cdot 10^6$	$12.7 \cdot 10^{16}$
ТКО	$145.0 \cdot 10^6$	$180.0 \cdot 10^{16}$	$2.6 \cdot 10^6$	$3.0 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$2.3 \cdot 10^6$	$10.2 \cdot 10^{16}$	$12.7 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^{16}$

Около 40% отработанных масел не перерабатывается (коэффициент $l_{oil}=0.4$), которые могут быть использованы для приготовления композиционного топлива. Для типичных масел теплота сгорания $\sim 44.0 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{oil}).

Энергия от сжигания накопленных отработанных масел до 2020 года:

$$Q_{oil}^0 = G_{oil}^0 \cdot q_{oil} \quad (5.5)$$

- в Томской области $Q_{oil}^0 = 2,219.4 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 9.8 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{oil}^0 = 97.3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 0.4 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Кемеровской области $Q_{oil}^0 = 0$ Дж.

Энергетический потенциал от сжигания отработанных масел, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{oil} = l_{oil} \cdot G_{oil} \cdot q_{oil} \quad (5.6)$$

- в Томской области $Q_{oil} = 0.4 \cdot 11.5 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 0.2 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{oil} = 0.4 \cdot 0.7 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 1.2 \cdot 10^{13}$ Дж;
- в Кемеровской области $Q_{oil} = 0.4 \cdot 0.5 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 0.9 \cdot 10^{13}$ Дж.

Результаты выполненных исследований приведены в таблице 5.1.4. Таблица показывает, что уже накопленные и ежегодно производимые промышленные отходы и ТКО имеют сравнительно высокий уровень энергетического потенциала. Поэтому такие отходы могут быть использованы при выработке энергии местными угольными тепловыми электрическими станциями.

5.1.4. Потребность в энергоресурсах угольных котельных установок большой и малой энергетики

Для рассматриваемых регионов (рисунок 5.1.1) собственные нужды в теплоте и электрической энергии покрываются преимущественно за счет местных тепловых электрических станций. В Кемеровской и Новосибирской областях основным топливом являются каменные угли, добываемые на местных месторождениях, резервным топливом является природный газ. В Томской области основным энергоресурсом является природный газ, который добывается на территории этого региона [92]. Несмотря на это, все котлы при проектировании и строительстве изначально рассчитаны на сжигание угля, их перевод на природный газ выполнен после начала промышленной добычи природного газа в регионе [92]. Основные характеристики тепловых электрических станций приведены в таблице 5.1.5.

Таблица 5.1.5. Характеристики тепловых электрических станций

Тепловая электрическая станция	Установленная электрическая мощность	Установленная тепловая мощность	Выработка электроэнергии	Выработка теплоты	Удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию	Удельный расход условного топлива на отпущенную теплоту	Топливный баланс			Полученная теплота от сжигания угля в топке котла	Ссылка
	МВт	Гкал/ч	кВт·ч (× 10 ⁶)	Гкал (× 10 ³)	г у.т. /кВт·ч	кг у.т. /Гкал	Уголь	Газ	Мазут		
							%	%	%	Дж (× 10 ¹⁶)	—
Кемеровская область (регион № 1)											
К. ГРЭС	485	1540	2053	2524	362	152	76.8	22.8	0.4	2.5	[90]
К. ТЭЦ	80	749	175	725	383	168	91.3	8.7	0	0.5	
Н-К. ТЭЦ	565	1449	1946	2911	370	160	99.4	0.5	<0.1	3.5	
Новосибирская область (регион № 2)											
ТЭЦ-2	345	920	1122	1899	328.5	146.8	91.1	8.8	0.1	1.7	[91]
ТЭЦ-3	511.5	1115	2246	2390	293.5	143.6	99.7	0	0.3	2.9	
ТЭЦ-4	384	1120	1363	2251	314.8	143.8	80.9	19.1	0	1.8	
ТЭЦ-5	1200	2730	7065	4652	292.9	138	99.5	0.1	0.4	7.9	
Томская область (регион № 3)											
ТЭЦ-1	14.7	795	3.3	651	326	138	0	99.9	<0.1	0	[92]
ТЭЦ-3	140	780	746	1694	268.5	131	0	99.9	<0.1	0	
ГРЭС-2	331	815	1104	2154	249	159.6	47.6	52.4	0	0.9	
Общие данные для трех регионов											
—	4056	12013	17823	21851	—	—	—	—	—	21.7	—

Комбинированная выработка теплоты и электрической энергии в Кемеровской области осуществляется на трех станциях [90]: (Кемеровская ГРЭС, Кемеровская ТЭЦ, Ново-Кемеровская ТЭЦ). Малые котельные (около 100 штук), суммарная установленная тепловая мощность которых составляет 904 Гкал/ч, обеспечивают теплом преимущественно жилищно-коммунальный сектор и малые промышленные предприятия. Основными источниками теплоснабжения и электроснабжения в Новосибирской области являются четыре станции [91]: ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5. Суммарная установленная мощность котельных (более 200 штук) составляет 3733 Гкал/ч. Около 93% этой энергии генерируют котельные, работающие на природном газе, остальную часть энергии генерируют угольные котельные и установки, работающие на мазуте [91].

Основными источниками теплоснабжения и электроснабжения в Томской области являются 3 станции [92]: ТЭЦ-1, ТЭЦ-3, ГРЭС-2. Суммарная установленная мощность котельных (52 шт.) составляет 762 Гкал/ч. Около 81% этой энергии генерируют котельные, работающие на природном газе, остальную часть энергии генерируют угольные котельные и установки, работающие на мазуте. Основные характеристики углей, используемых в качестве топлива на тепловых электрических станциях, приведены в таблице 5.1.6. Это преимущественно каменные угли Кузнецкого и Канско-Ачинского угольных бассейнов.

Совместный анализ таблиц 5.1.5 и 5.1.6 позволяет вычислить количество угля, сжигаемого котельными и тепловыми электрическими станциями трех регионов для производства теплоты и электрической энергии. Ежегодный расход высококачественного угля [90-94] составляет около $10216 \cdot 10^3$ тонн (Томская область – $403 \cdot 10^3$ тонн, Новосибирская область – $7149 \cdot 10^3$ тонн, Кемеровская область – $2664 \cdot 10^3$ тонн). При сжигании такого количества угля выделяется около $21.7 \cdot 10^{16}$ Дж теплоты. Замена угля на композиционное топливо из отходов углеобогащения (или низкокачественного угля), ТКО, отработанных масел (или горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки) позволит снизить расход высококачественных исчерпаемых полезных ископаемых.

Таблица 5.1.6. Характеристики углей, используемых для генерации энергии

ТЭС	Уголь	$Q_{s,v}^a$, Дж/кг ($\times 10^6$)	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Ссылка
Кемеровская область (регион № 1)						
Кем. ГРЭС	Каменный уголь марки СС	21.8	13.12	17.2	27	[90]
Кем. ТЭЦ	Каменный уголь марки ДР	21.8	14.7	15.4	42.3	
Н-К. ТЭЦ	Каменный уголь марки Д	21.4	14.1	13.1	41.2	
Котельн.	Каменный уголь марки Д	21.4	14.1	13.1	41.2	
Новосибирская область (регион № 2)						
ТЭЦ-2	Каменный уголь марки СС и Т	24.7	8.3	16.9	23.9	[91]
ТЭЦ-3	Каменный уголь марки СС и Т	22.1	17.5	15.5	19.1	
	Бурый уголь марки Б	14.8	35.7	7.6	46.4	
ТЭЦ-4	Каменный уголь марки СС и Т	25	9	15.7	19	
ТЭЦ-5	Каменный уголь марки Г и Д	21.6	14.7	13.1	41.4	
Котельн.	Каменный уголь марки СС и Т	24.9	8.3	16.9	23.9	
	Бурый уголь марки Б	14.8	35.7	7.6	46.4	
	Каменный уголь марки Г и Д	21.8	14.7	13.1	41.4	
Томская область (регион № 3)						
ГРЭС-2	Каменный уголь марки Д	21.4	14.1	13.1	41.2	[92]
Котельн.	Каменный уголь марки Д	21.2	13.9	14.5	44.7	
	Каменный уголь марки ДР	21.8	12	15.9	48	

5.1.5. Стратегия совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии

В таблицах 5.1.4 и 5.1.5 приведены данные по энергетическому потенциалу промышленных отходов и ТКО, а также по количеству теплоты, получаемой от сжигания угля в топках котлов тепловых электрических станций. Сопоставление соответствующих характеристик позволяет сделать вывод о перспективах применения на практике композиционных топлив из отходов углеобогащения, низко-

сортных углей, ТКО, отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки, ежегодное производство и запасы которых позволят в среднесрочной перспективе (20–30 лет) обеспечить 100% потребность угольной теплоэнергетики трех регионов (рисунок 5.1.1) в энергоресурсах.

Стратегия совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов путем сжигания в составе композиционных топлив предполагает следующее. Весь объем (около $21.7 \cdot 10^{16}$ Дж) энергии (таблица 5.1.4), генерируемой угольными тепловыми электрическими станциями, будет производиться в результате сжигания композиционного топлива. Типичный состав такого топлива: 85% фильтр-кек (или смесь низкосортного угля с водой), 10% ТКО, 5% отработанное масло. Для замены угля эквивалентным по энергосодержанию количеством композиционного топлива потребность в его компонентах в первый год составит (таблица 5.1.7): $11.13 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кека; $1.31 \cdot 10^6$ тонн ТКО; $0.65 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. Предполагается, что в соответствии с общемировыми прогнозами роста энергопотребления в каждый последующий год количество энергии, получаемой от сжигания топлива и необходимой для производства тепла и электричества, будет возрастать на 1% по сравнению с предыдущим годом (таблица 5.1.7). Соответственно, расход компонентов, используемых для приготовления композиционного топлива, также будет расти.

Горючая жидкость (согласно данным таблицы 5.1.7) является лимитирующим компонентом для приготовления такого состава композиционного топлива. За четыре года реализации предполагаемой энергетической программы все накопленное отработанное масло закончится, и дальнейшее его использование будет невозможно. Как следствие, начиная с пятого года, в состав композиционного топлива будет входить 85% фильтр-кека и 15% ТКО.

Таблица 5.1.7. Расход компонентов для композиционного топлива

Год	Энергия от сжигания топлива, Дж ($\times 10^{16}$)	Расход угля, тонн ($\times 10^6$)	Расход КЖТ (по компонентам)			
			Фильтр кек, тонн ($\times 10^6$)	ТКО, тонн ($\times 10^6$)	Масло, тонн ($\times 10^6$)	Всего, тонн ($\times 10^6$)
1	21.70	10.22	11.13	1.31	0.65	13.10
2	21.92	10.32	11.24	1.32	0.66	13.23
3	22.14	10.42	11.36	1.34	0.67	13.36
4	22.36	10.53	11.47	1.35	0.67	13.49
5	22.58	10.63	11.58	2.04	—	13.63
6	22.81	10.74	11.70	2.06	—	13.77
7	23.03	10.84	11.81	2.08	—	13.90
8	23.27	10.96	11.94	2.11	—	14.04
9	23.50	11.06	12.05	2.13	—	14.18
10	23.73	11.17	12.17	2.15	—	14.32
11	23.97	11.29	12.30	2.17	—	14.47
12	24.21	11.40	12.42	2.19	—	14.61
13	24.45	11.51	12.54	2.21	—	14.76
14	24.70	11.63	12.67	2.24	—	14.91
15	24.94	11.74	12.79	2.26	—	15.05
16	25.19	11.86	12.92	2.28	—	15.20
17	25.44	11.98	13.05	2.30	—	15.35
18	25.70	12.10	13.18	2.33	—	15.51
19	25.96	12.22	13.32	2.35	—	15.67
20	26.22	12.34	13.45	2.37	—	15.82
21	26.49	12.47	13.59	2.40	—	15.99
22	26.74	12.59	13.72	2.42	—	16.14
23	27.01	12.72	13.86	2.45	—	16.30
24	27.28	12.84	13.99	2.47	—	16.46
25	27.55	12.97	14.13	2.49	—	16.63
Всего	612.89	288.55	314.39	52.82	2.66	369.87

Ежегодная потребность в компонентах такого топлива составит: не менее $11.5 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кек и не менее $2.0 \cdot 10^6$ тонн ТКО. В таблице 5.1.7 по годам

приведен состав композиционного топлива и расход каждого его компонента при реализации предлагаемой стратегии утилизации отходов в условиях ежегодного увеличения энергопотребления на 1% по сравнению с предыдущим годом.

В течение 25 лет реализации энергетической программы будет утилизировано (таблица 5.1.7): $314.39 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кека; $52.82 \cdot 10^6$ тонн ТКО; $2.66 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. Предлагаемые мероприятия согласно таблица 5.1.4 позволят решить проблему утилизации накопленных до 2020 года отработанных масел, жидких горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки, а также проблему утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и на 84% уменьшить количество накопленных до 2020 года фильтр-кеков. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив ТКО позволит решить проблему их утилизации до перехода на новую систему утилизации отходов с высокой долей переработки и повторного использования ТКО и на 36% уменьшить количество накопленных на полигонах и не переработанных до 2020 года ТКО.

Следует отметить, что предлагаемая стратегия совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов путем сжигания в составе композиционных топлив характеризуется уменьшением площадей полигонов за счет плановой утилизации твердых коммунальных отходов, а также эффективным инвестированием средств, сэкономленных за счет снижения расходов на приобретение энергоресурсов, для развития передовых технологий в промышленной теплоэнергетике и модернизации тепловых станций.

Результаты экспериментальных исследований [72,73] позволяют сделать вывод о том, что основные экологические характеристики (CO , CO_2 , NO_x , SO_x , зола микронных фракций) дымовых газов при сжигании композиционных топлив, приготовленных из низкосортных углей или отходов углеобогащения, воды и горючей жидкости не хуже, чем аналогичные характеристики дымовых газов при сжигании угольной пыли по традиционной для угольных ТЭС технологии. Возможность варьирования компонентной базы композиционных топлив в широких диапазонах позволяет разрабатывать топливные составы с прогнозируемыми энергетическими, экономическими и экологическими характеристиками.

5.2. Перспективы утилизации коммунальных и промышленных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии в мире

Исходные данные для расчета энергетического потенциала ТКО [101]:

- в мире к 2020 году уже накоплено и не утилизировано (хранится на полигонах) около 50.0 млрд. тонн ТКО (величина G_{MSW}^0);
- ежегодный объем мирового производства ТКО составляет около 1.5 млрд. тонн (величина G_{MSW});
- около 60% ТКО не перерабатывается, а складывается на полигонах (коэффициент $k_{MSW}=0.6$);
- из неперерабатываемых ТКО около 80% массы является горючей (коэффициент $l_{MSW}=0.8$);
- для типичного морфологического состава ТКО усредненная теплота сгорания составляет около $11.8 \cdot 10^6$ Дж/кг (величина q_{MSW}).

Энергетический потенциал от сжигания накопленных ТКО в мире до 2020 года:

$$Q_{MSW}^0 = l_{MSW} \cdot G_{MSW}^0 \cdot q_{MSW} = 0.8 \cdot 50.0 \cdot 10^{12} \cdot 11.8 \cdot 10^6 = 472.0 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.7)$$

Энергетический потенциал от сжигания ТКО, накапливаемых в течение года:

$$Q_{MSW} = k_{MSW} \cdot l_{MSW} \cdot G_{MSW} \cdot q_{MSW} = 0.6 \cdot 0.8 \cdot 1.5 \cdot 10^{12} \cdot 11.8 \cdot 10^6 = 8.5 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.8)$$

Исходные данные для расчета энергетического потенциала фильтр-кеков и низкосортных углей [101]:

- в мире с 1980 года по 2020 год уже накоплено и не утилизировано (хранится на полигонах) около 9.5 млрд. тонн фильтр-кека (величина G_{fc}^0);
- ежегодный объем мирового производства фильтр-кека составляет около 0.2 млрд. тонн (величина G_{fc}), т.е. это 10–15% от объема экспортируемого угля в мире;
- ежегодное потребление угля в мире составляет около 7.4 млрд. тонн (величина G_c);
- около 15% потребляемого угля является низкосортным (коэффициент $l_{lc}=0.15$);
- для типичного фильтр-кека теплота сгорания составляет около $20.0 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{fc});

- для типичного низкосортного угля теплота сгорания составляет около $25.0 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{lc}).

Энергетический потенциал от сжигания накопленных фильтр-кеков в мире до 2020 года:

$$Q_{fc}^0 = G_{fc}^0 \cdot q_{fc} = 9.5 \cdot 10^{12} \cdot 20.0 \cdot 10^6 = 190.0 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.9)$$

Энергетический потенциал от сжигания фильтр-кеков, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{fc} = G_{fc} \cdot q_{fc} = 0.2 \cdot 10^{12} \cdot 20.0 \cdot 10^6 = 4 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.10)$$

Энергетический потенциал от сжигания низкосортных углей, добываемых в течение одного года:

$$Q_{lc} = l_c \cdot G_c \cdot q_{lc} = 0.15 \cdot 7.4 \cdot 10^{12} \cdot 25.0 \cdot 10^6 = 27.8 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.11)$$

Исходные данные для расчета энергетического потенциала жидких горючих отходов (отработанные масла) [78]:

- в мире с 1990 года по 2020 год уже накоплено и не утилизировано, а хранится на полигонах около 0.3 млрд. тонн отработанных масел (величина G_{oil}^0);
- ежегодный объем мирового производства отработанных масел составляет около 0.02 млрд. тонн (величина G_{oil});
- около 40% отработанных масел не перерабатывается (коэффициент $l_{oil}=0.4$);
- для типичных масел теплота сгорания составляет около $44.0 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{oil}).

Энергетический потенциал от сжигания накопленных отработанных масел в мире до 2020 года:

$$Q_{oil}^0 = G_{oil}^0 \cdot q_{oil} = 0.3 \cdot 10^{12} \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 13.2 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.12)$$

Энергетический потенциал от сжигания отработанных масел, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{oil} = l_{oil} \cdot G_{oil} \cdot q_{oil} = 0.4 \cdot 0.02 \cdot 10^{12} \cdot 44.0 \cdot 10^6 = 0.4 \cdot 10^{18} \text{ Дж.} \quad (5.13)$$

По данным статистики в мире при сжигании угля за год производится [7]:

- электрической энергии около $9.5 \cdot 10^{15}$ Вт·ч или $34.3 \cdot 10^{18}$ Дж (для производства такого количества энергии требуется сжечь около 22% от общего количества потребляемого угля за один год);

- теплоты около $5.9 \cdot 10^{18}$ Дж (для производства такого количества энергии требуется сжечь около 3.15% от общего количества потребляемого угля за год).

Среднее общемировое потребление угля за один год составляет около 7.5 млрд. тонн, т.е. для производства электричества и тепла сжигается около 1.9 млрд. тонн высококачественного угля с теплотой сгорания около $30.0 \cdot 10^6$ Дж/кг. Использование композиционного топлива из фильтр-кеков, отработанных масел и ТКО позволит уменьшить расход высококачественных исчерпаемых энергоресурсов.

В таблице 5.2.1 приведены данные по объемам производства и энергетическому потенциалу фильтр-кеков, низкосортных углей, отработанных масел, а также по объемам потребления угля и выработки энергии при его сжигании на ТЭС. Согласно результатам, приведенным в таблице 5.2.1, можно сделать вывод о перспективах применения на практике композиционных топлив из отходов углеобогащения, низкосортных углей, отработанных масел, ТКО, ежегодное производство и запасы которых позволят в среднесрочной перспективе (не менее 20 лет) обеспечить до 100% потребностей угольной теплоэнергетики в энергоресурсах.

Таблица 5.2.1. Энергетический потенциал и расход энергоресурсов

Энергоресурсы	Суммарно накоплено		Ежегодный прирост / потребление	
	G^0 , тонн	Q^0 , Дж	G , тонн	Q , Дж
Фильтр-кек	$9.5 \cdot 10^9$	$190.0 \cdot 10^{18}$	$0.2 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^{18}$
Низкосортный уголь	—	—	$1.1 \cdot 10^9$	$27.8 \cdot 10^{18}$
ТКО	$50.0 \cdot 10^9$	$472.0 \cdot 10^{18}$	$0.7 \cdot 10^9$	$8.5 \cdot 10^{18}$
Отработанное масло	$0.3 \cdot 10^9$	$13.2 \cdot 10^{18}$	$0.01 \cdot 10^9$	$0.4 \cdot 10^{18}$
Уголь для теплоэнергетики	—	—	$1.9 \cdot 10^9$	$57.0 \cdot 10^{18}$

С целью расширения топливной теплоэнергетической базы возможна реализация программы, которая предполагает следующее. Около 50% (или $28.5 \cdot 10^{18}$ Дж) энергии (таблица 5.2.1), генерируемой угольными тепловыми электрическими

станциями, для производства электричества и теплоты будет производиться в результате сжигания композиционного топлива. Предполагается, что топливо будет состоять из: 80% фильтр-кек (или смесь низкосортного угля с водой), 15% ТКО, 5% отработанное масло. Ежегодная потребность в компонентах такого топлива составит: $1.1 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кека; $0.2 \cdot 10^9$ тонн ТКО; $0.09 \cdot 10^9$ тонн отработанного масла. Горючая жидкость (согласно данным таблицы 5.2.2) является лимитирующим компонентом для приготовления такого состава композиционного топлива. За четыре года реализации предполагаемой энергетической программы все накопленное отработанное масло закончится, и дальнейшее его использование будет невозможно. Поэтому, начиная с пятого года, в состав композиционного топлива будет входить 80% фильтр-кека и 20% ТКО. Каждый год будет требоваться: $1.24 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кеков; $0.31 \cdot 10^9$ тонн ТКО. В таблице 5.2.2 по годам приведен состав композиционного топлива и расход каждого его компонента при реализации предлагаемой стратегии утилизации отходов.

В течение 20 лет (регламентированный срок эксплуатации котла в теплоэнергетике) реализации энергетической программы будет утилизировано $24.24 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кека; $5.76 \cdot 10^9$ тонн ТКО; $0.36 \cdot 10^9$ тонн отработанного масла. Предлагаемые мероприятия согласно таблице 5.2.1 и 5.2.2 позволят решить проблему утилизации накопленных до 2020 года отработанных масел, а также проблему утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и на 10% уменьшить объем фильтр-кеков, которые были накоплены до 2020 года. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив ТКО позволит утилизировать их в количестве до 50% от ежегодного объема производства.

Следует отметить, что предлагаемый подход характеризуется несколькими положительными эффектами:

- экономия высококачественного твердого натурального топлива (ежегодно около $1.0 \cdot 10^9$ тонн) за счет сокращения объемов его потребления (на 50%) на объектах теплоэнергетики в результате замены эквивалентным количеством (около $1.5 \cdot 10^9$ тонн) композиционного топлива;

- за счет утилизации твердых отходов происходит снижение загрязнения окружающей среды;
- уменьшение площадей полигонов за счет плановой утилизации твердых коммунальных отходов (до 50% от ежегодного производства или до $0.31 \cdot 10^9$ тонн);
- эффективное инвестирование средств, сэкономленных за счет снижения расходов на приобретение энергоресурсов, для развития передовых технологий в промышленной теплоэнергетике и модернизации тепловых электрических станций.

Таблица 5.2.2. Расход компонентов на приготовление композиционного топлива

Год	Фильтр-кек, тонн	ТКО, тонн	Отработанное масло, тонн
1	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
2	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
3	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
4	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
5	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
6	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
7	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
8	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
9	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
10	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
11	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
12	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
13	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
14	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
15	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
16	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
17	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
18	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
19	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
20	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	—
Всего:	$24.24 \cdot 10^9$	$5.76 \cdot 10^9$	$0.36 \cdot 10^9$

Смысл последнего утверждения состоит в том, что утилизация твердых коммунальных отходов путем сжигания с выработкой энергии является промежуточным этапом при переходе от прямого сжигания отходов без использования теплоты к переработке отходов и повторному использованию в качестве сырья. Поэтому разработка и внедрение принципиально новых технологий, строительство новых промышленных объектов (мусоросжигательных заводов), которые будут востребованы в течение относительно короткого промежутка времени (10–20 лет), экономически нецелесообразны.

В последние годы достаточно большое внимание уделяется изучению процессов газификации разных веществ и материалов (низкокачественных полезных ископаемых, биомассы, твердых коммунальных отходов и т.д.) и разработке соответствующих промышленных технологий получения синтез-газа [97–99]. Технология производства электроэнергии и тепла при сжигании синтез-газа характеризуется минимальным содержанием вредных веществ (CO , CO_2 , NO_x , SO_x) в дымовых газах, концентрация которых не превышает аналогичного показателя при сжигании природного газа. Поэтому по экологическим показателям эффективность сжигания синтез-газа, полученного путем газификации твердых коммунальных отходов, выше эффективности сжигания типичных композиционных жидких топлив с добавлением таких отходов в виде мелкодисперсных твердых компонентов. Однако в настоящее время применение на практике технологий производства синтез-газа ограничено. Основным барьером, который препятствовал широкому внедрению передовых технологий газификации для обработки ТКО, было более высокое содержание золы в сырье, которое затрудняет работу по газификации. Кроме того, большое количество загрязняющих веществ смолы и угля в добываемом газе делает его непригодным для производства электроэнергии с использованием газовых двигателей или турбин [98].

Следует отметить, что применение синтез-газа на существующих объектах теплоэнергетики вместо широко распространенного твердого натурального топлива потребует реализации дополнительных достаточно затратных мероприятий по дооснащению технологического процесса установкой промышленной газификации

отходов или монтажа коммуникаций и резервуаров для поставки и хранения синтез-газа, производимого на заводах, а также обеспечения нормативных показателей взрыво-, пожаробезопасности. Кроме этого для реализации самой технологии газификации твердых коммунальных отходов требуются достаточно большие затраты энергии. Как правило, в реакторе поддерживается достаточно высокая температура около 900 °С [97, 98] в инертной газовой среде для интенсивного протекания термического разложения твердых материалов. Создание таких условий требует существенного расхода энергоресурсов. По этим причинам утилизация ТКО путем сжигания в составе композиционного жидкого топлива является перспективной для практической реализации.

Результаты экспериментальных исследований [72,73] позволяют сделать вывод о том, что основные экологические характеристики (CO , CO_2 , NO_x , SO_x , зола микронных фракций) дымовых газов при сжигании композиционных топлив, приготовленных из низкосортных углей или отходов углеобогащения, воды и горючей жидкости не хуже, чем аналогичные характеристики дымовых газов при сжигании угольной пыли по традиционной для угольных ТЭС технологии. Возможность варьирования компонентной базы композиционных топлив в широких диапазонах позволяет разрабатывать топливные составы с прогнозируемыми энергетическими, экономическими и экологическими характеристиками.

Выводы по пятой главе

1. Полученные результаты являются основой для разработки в регионах (в одних – с высоким уровнем добычи твердых и жидких ископаемых топлив, в других – с высоким уровнем социального развития и промышленного производства) совместных мероприятий по внедрению перспективной технологии сжигания на ТЭС композиционных топлив, приготовленных из промышленных и коммунальных отходов. Одним из преимуществ такой технологии является возможность оптимизации режимов работы основного технологического оборудования при варьировании состава композиционных топлив и концентрации горючих компонентов.

2. Показано, что при частичной замене угля (50% по генерации энергии) эквивалентным по калорийности количеством перспективного композиционного топлива экономия высококачественного твердого натурального топлива будет составлять около 1 млрд. тонн ежегодно на протяжении 20 лет (в течение регламентированного срока эксплуатации котла в теплоэнергетике). В течение этого же промежутка времени будет утилизировано $24.24 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кеков; $5.76 \cdot 10^9$ тонн ТКО; $0.36 \cdot 10^9$ тонн отработанных масел. В случае принятия программы решится проблема утилизации отработанных масел, накопленных до 2020 года, а также проблема утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и на 10% уменьшить объем фильтр-кеков, накопленных до 2020 года. Также возможно утилизирование твердых коммунальных отходов в составе композиционных топлив в количестве до 50% от ежегодного объема их производства.
3. В трех регионах Российской Федерации был выполнен сравнительный анализ, который показал, что, если полностью заменить уголь композиционным топливом (эквивалентным по калорийности) экономия твердого натурального топлива будет составлять не менее 10 млн тонн ежегодно на протяжении 25 лет (в течение периода перехода на новую систему утилизации отходов с высокой долей переработки и повторного использования твердых коммунальных отходов). Предполагается утилизация около 315 млн тонн фильтр-кеков; около 53 млн тонн ТКО; около 2.5 млн тонн отработанных масел. Данные мероприятия позволят 84% уменьшить количество накопленных до 2020 года фильтр-кеков, а также утилизировать все отработанное горючее. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив твердых коммунальных отходов позволит решить проблему их утилизации до перехода на новую систему утилизации отходов (с высокой долей переработки и повторного использования ТКО) и на 36% уменьшить количество твердых коммунальных отходов, которые были накоплены на полигонах и не переработаны до 2020 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных диссертационных экспериментальных и теоретических исследований сформулированы следующие выводы и заключения:

1. Увеличение концентрации жидкого горючего компонента может существенно влиять на предельные (минимальные) температуры зажигания (t_g^{lim}) КЖТ с и без добавления твердых коммунальных отходов, а также интегральные характеристики исследуемых процессов – времена задержки зажигания τ_d и времена горения τ_c . Рост или снижение этих параметров определяется влажностью, тепловым эффектом испарения, температурой воспламенения и калорийностью горючих компонентов КЖТ. Относительно небольшая доля (до 10 %) добавленного высокосортного угля в КЖТ может приводить к снижению времен τ_d и τ_c на 20–30 %. Увеличение концентрации воды в ОВУТ на 5–15 % приводит к ухудшению характеристик процесса инициирования горения на 30–40 %. Главным образом этот эффект влияет на первые две стадии: инертный прогрев капли и испарение влаги из ее приповерхностного слоя.
2. На примере рассмотренных составов композиционного топлива (фильтр-кек с добавками древесины, пищевых отходов, пластика, картона) и топливных суспензий из воды и углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин экспериментально обоснована устойчивость зажигания и выгорания капель топлива в условиях, характерных для топок котельных установок большой и малой энергетики. Установлено, что температура в камере сгорания около 450 °С является минимальной, необходимой для устойчивого зажигания исследованных КЖТ. При идентичных условиях нагрева минимальные времена задержки зажигания наблюдаются у состава на основе кека 90% и картона 10%. Установлена область времен задержки гарантированного (устойчивого) зажигания капель размерами около 1 мм рассмотренных составов композиционного топлива в широком диапазоне варьирования температуры окружающей среды 600–1000 °С. Минимальные значения времен задержки зажигания составляют около 3 с, максимальные – около 25 с. Максимальное отличие времен задержки зажигания для составов с разными компонентами составляет менее

25% в области относительно невысоких температур (600–700 °С). При температурах окружающей среды более 900 °С отличие времен задержки зажигания для разных составов топлива не превышает 10%. Получены аппроксимационные выражения $\tau_d = f(t_g)$ для оценки средних значений времен задержки зажигания капель композиционных топлив.

3. При добавлении твердых коммунальных отходов в состав композиционного топлива в процессе его горения наблюдается меньшая концентрация основных антропогенных выбросов в составе газообразных продуктов сгорания по сравнению с топливом без твердых коммунальных отходов. Максимальное отличие концентраций NO_x и SO_x для таких составов топлив составляет около 60% и 35%, соответственно. В абсолютных единицах измерения эти отличия составляют около 110 ppm и 45 ppm, соответственно. Максимальные концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания кека составляют около 300 ppm и около 130 ppm, соответственно. Таким образом добавки твердых коммунальных отходов в состав композиционного топлива существенно влияют на снижение концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах. Наличие в составе топлива примесей активных металлов (благодаря присутствию ТКО) увеличивает степень захвата и удержания оксидов серы и создает благоприятные условия для восстановления оксидов азота до свободного N_2 . Данные металлы при взаимодействии с молекулами воды образуют гидроксиды, которые при взаимодействии с оксидами серы формируют сульфаты, выпадающие в золу. Фактор лимитирования температуры горения КЖТ чрезвычайно важен в системах утилизации твердых коммунальных отходов, так как при сжигании ТКО в условиях температур менее 1300 °С все опасные газообразные вещества разлагаются на простейшие, что исключает присутствие в составе дымовых газов вредных (наиболее опасных для процессов сжигания ТКО) выбросов диоксинов или фуранов.
4. Скорости выгорания КЖТ, приготовленных на основе отходов углеобогащения (фильтр-кеков), близки (отличия менее 10%) к скоростям выгорания сус-

пензий, приготовленных из углей. Экономические и экологические индикаторы кеков в разы выше, чем у углей. Поэтому целесообразно применение фильтр-кеков, как основного горючего компонента КЖТ при утилизации твердых коммунальных отходов.

5. Скорости выгорания топливных композиций с добавлением отработанных масел в 1.5–2 раза выше чем без добавления. С ростом температуры в камере сгорания и размеров капель топлив скорости выгорания по экспоненциальным зависимостям увеличиваются. Введение в состав КЖТ группы типичных твердых коммунальных отходов с относительной концентрацией не выше 20% практически не снижает значения скоростей выгорания. Получены аппроксимационные выражения для данных зависимостей. Показано определяющее влияние на скорости выгорания топливных суспензий группы факторов, таких как свойства и концентрации основных компонентов, температуры в камере сгорания и размеров капель. Также определено, что скорости выгорания ВУТ и ОВУТ слабо меняются при изменении температуры в камере сгорания (выше 600 °C).
6. По результатам выполненного математического моделирования определены характеристики процесса горения КЖТ с и без ТКО в топочной камере действующего котельного агрегата. Проведено сравнение результатов, полученных на модели и с помощью экспериментов. Расхождение составляет не более 10%. Представленная модель сжигания КЖТ может использоваться для прогнозирования интегральных характеристик горения составов с варьируемыми характеристиками в широких диапазонах. С ее использованием можно прогнозировать перспективы применения КЖТ с ТКО и другими отходами в топочных камерах котельных установок. На разработанной модели проведено варьирование некоторых параметров с целью нахождения оптимальных условий горения. Повышение концентрации ТКО от 0 до 50 % в составе КЖТ приводит к снижению температуры в топочной камере с 1200 °C до 900 °C. Концентрации антропогенных выбросов SO_x и NO_x так же снижаются до 70 и 200 ppm, соответственно, благодаря образованию солей в золе, а также уменьшению

азота и серы в исходном топливе. Однако рост концентрации твердых коммунальных отходов уже выше 20% нецелесообразно из-за снижения температуры в области горения ниже 1000°C . Оптимальный температурный диапазон сжигания КЖТ с добавлением ТКО составил от 1000°C до 1200°C . Концентрации NO_x и SO_x в таких условиях находились в пределах от 140 до 75 ppm и от 380 до 230 ppm соответственно. Проведены расчеты по нахождению оптимального расхода воздуха, расхода топлива, а также оптимальной концентрации добавленных в композиционное топливо твердых коммунальных отходов. Определено что для исследуемого котла заданной геометрии оптимальным расходом воздуха является $0.25 \text{ м}^3/\text{с}$, а оптимальным расходом топлива является 0.09 кг/с .

7. Полученные результаты являются основой для разработки в регионах с высокими темпами добычи твердых и жидких ископаемых топлив или с высоким уровнем социального развития и промышленного производства совместных мероприятий по внедрению перспективной технологии сжигания композиционных топлив, приготовленных из промышленных и коммунальных отходов. Одним из преимуществ такой технологии является возможность оптимизации режимов работы основного технологического оборудования при варьировании состава композиционных топлив и концентрации горючих компонентов.
8. Показано, что при частичной замене угля (50% по генерации энергии) эквивалентным по калорийности количеством перспективного композиционного топлива экономия высококачественного твердого натурального топлива будет составлять около 1 млрд. тонн ежегодно на протяжении 20 лет (в течение регламентированного срока эксплуатации котла в теплоэнергетике). В течение этого же промежутка времени будет утилизировано $24.24 \cdot 10^9$ тонн фильтр-кеков; $5.76 \cdot 10^9$ тонн ТКО; $0.36 \cdot 10^9$ тонн отработанных масел. В случае принятия программы решится проблема утилизации отработанных масел, накопленных до 2020 года, а также проблема утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и на 10% уменьшить объем фильтр-кеков, накопленных до 2020 года. Также возможно утилизирование твердых коммунальных отходов

в составе композиционных топлив в количестве до 50% от ежегодного объема их производства.

9. Был выполнен сравнительный анализ для Кемеровской, Томской и Новосибирской областей который показал: если полностью заменить уголь композиционным топливом (эквивалентным по калорийности) экономия твердого натурального топлива будет составлять не менее 10 млн тонн ежегодно на протяжении 25 лет (в течение периода перехода на новую систему утилизации отходов с высокой долей переработки и повторного использования твердых коммунальных отходов). Предполагается утилизация около 315 млн тонн фильтр-кеков; около 53 млн тонн ТКО; около 2.5 млн тонн отработанных масел. Данные мероприятия позволят 84% уменьшить количество накопленных до 2020 года фильтр-кеков, а также утилизировать все отработанное горючее. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив твердых коммунальных отходов позволит решить проблему их утилизации до перехода на новую систему утилизации отходов (с высокой долей переработки и повторного использования ТКО) и на 36% уменьшить количество ТКО, накопленных на полигонах и не переработанных до 2020 года.
10. При добавлении твердых коммунальных отходов в состав КЖТ в процессе горения образца идентичной массы выделяется эквивалентное количество энергии с меньшей концентрацией основных антропогенных выбросов. Поэтому полученные результаты являются основой для разработки экологически, энергетически и экономически эффективной технологии утилизации твердых коммунальных отходов путем сжигания в составе композиционных топлив в топках котлов вместо угля.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса ТПУ за помощь в проведении экспериментальных и теоретических исследований.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$AЭС$ – атомная электростанция;

$ВУТ$ – водоугольное топливо;

$ГРЭС$ – государственная районная электростанция;

$ГЭС$ – гидроэлектростанция;

$КЖТ$ – композиционное жидкое топливо;

$КПД$ – коэффициент полезного действия;

$НИЭ$ – нетрадиционные источники энергии;

$НСО$ – нефтесодержащие отходы;

$ОВУТ$ – органоводоугольное топливо;

$ТКО$ – твердые коммунальные отходы;

$ТЭС$ – тепловая электростанция;

$ТЭЦ$ – теплоэлектроцентраль;

A_d – зольность в сухом состоянии, %;

C_i – стоимость компонентов, \$/кг;

C^{daf} – содержание углерода на сухое беззольное состояние, %;

$D^{NO_x \& SO_x}$ – показатель, характеризующий получение количества энергии в расчете на стоимость топливной суспензии и концентрацию основных выбросов NO_x и SO_x , $(МДж/(\$ \cdot ppm))^2$;

$D_{relative}$ – показатель эффективности использования композиционного топлива относительно угля;

G_{MSW}^0 – накоплено и не утилизировано ТКО, тонн;

G_{MSW} – ежегодный объем производства ТКО, тонн;

G_{fc}^0 – накоплено и не утилизировано фильтр-кека, тонн;

G_{fc} – ежегодный объем производства фильтр-кека, тонн;

G_{oil}^0 – накоплено и не утилизировано отработанных масел, тонн;

G_{oil} – ежегодный объем производства отработанных масел, тонн;

G_c – ежегодное потребление угля в мире, тонн;

H^{daf} – содержание водорода на сухое беззольное состояние, %;

k^{MSW} – доля непереработанных горючих ТКО, складываемых на полигонах;

l_{oil} – коэффициент переработки масел;

l_{lc} – коэффициент потребляемого низкосортного угля;

M_{absolute} – абсолютное значение массы топлива, необходимое для получения идентичного количества теплоты, кг;

M_{relative} – относительное значение массы топлива, необходимое для получения идентичного количества теплоты;

$M_{\text{relative ash}}$ – относительное значение массы зольного остатка;

NO_x – концентрации оксидов азота, ppm;

O^{daf} – содержание кислорода на сухое беззольное состояние, %;

R_d – начальный радиус капли, мм;

SO_x – концентрации оксидов серы, ppm;

$Q_{s,V}^a$ – высшая теплота сгорания, МДж/кг;

Q_{MSW}^0 – энергетический потенциал от сжигания накопленных ТКО, Дж;

Q^{MSW} – энергетический потенциал от сжигания ТКО, накапливаемых в течение одного года, Дж;

Q_{fc}^0 – энергия от сжигания накопленных фильтр-кеков, Дж;

Q_{fc} – энергетический потенциал от сжигания фильтр-кеков, накапливаемых в течение одного года, Дж;

Q_{oil}^0 – энергия от сжигания накопленных отработанных масел, Дж;

Q_{oil} – энергетический потенциал от сжигания отработанных масел, накапливаемых в течение одного года, Дж;

Q_{lc} – энергетический потенциал от сжигания низкосортных углей, Дж;

q^{MSW} – усредненная теплота сгорания для типичного состава ТКО, МДж/кг;

q_{fc} – теплота сгорания для типичного фильтр-кека, МДж/кг;

q_{lc} – теплота сгорания для низкосортного угля, МДж/кг;

SO_x – концентрации оксидов серы, ppm;

t_d – температура в центре капли, °C;

t_d^{max} – максимальная температура в центре капли в процессе её нагрева, °C;

t_{ign} – температура зажигания жидкого горючего нефтепродукта, °C;

t_f – температура вспышки жидкого горючего нефтепродукта, °C;
 t_g – температура окислителя, °C;
 $t_g^{\min}$ – минимальная температура окислителя, необходимая для устойчивого зажигания, °C;
 τ – время, с;
 τ_b – время выгорания, с;
 τ_c – время полного сгорания, с;
 τ_d – время задержки зажигания, с;
 V_b – скорость горения (движение фронта горения по поверхности капли КЖТ), мм²/с;
 V_g – скорость потока окислителя, м/с;
 V^{daf} – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива, %;
 W^a – влажность, %;
 ρ – плотность, кг/м³.

Описание модели

m_p – масса частицы, кг;
 c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 T_p – температура частицы, К;
 A_p – эффективная площадь поверхности частицы, м²;
 E_r – плотность потока излучения;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана;
 $\dot{m}_{\text{char}}$ – скорость окисления угля, кг/с;
 $\Delta \dot{m}_j$ – массовая скорость изменения j-го компонента (H₂O, O₂, C_xH_y, C);
 h_j – энтальпия j-го компонента (H₂O, O₂, C_xH_y, C), Дж/кг;
 ρ – плотность, кг/м³;
 $\mathbf{v}$ – вектор скорости, м/с;
 p – давление, Па;
 τ_t – тензор рейнольдсовых напряжений;
 τ_μ – тензор вязких напряжений;

- S_{pm} – скорость изменения массы при межфазном взаимодействии;
 S_{pv} – скорость изменения импульса при межфазном взаимодействии.
 α_g – коэффициент поглощения излучения газом;
 α_p – коэффициент поглощения излучения частицами;
 ξ – коэффициент рассеяния анизотропии;
 γ_p – коэффициент дисперсии частиц;
 μ – гидродинамическая вязкость;
 d_p – диаметр частицы, м;
 C_D – коэффициент сопротивления частиц.
 D^b – коэффициент бинарной диффузии в несущую среду, м²/с;
 B_m – массовое число Спалдинга.
 α – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²К);
 B_T – коэффициент Сполдинга для теплоотдачи.
 m_{vol} – масса летучих с частицы, кг;
 $m_{0,vol}$ – общая масса летучих в начальной частице угля, кг;
 k_{vol} – скорость выхода летучих веществ, с⁻¹.
 k_p^c – скорость сгорания остатка, кг/(м² с);
 r_{char} – радиус остатка
 R_{EBU} – скорость реакции по модели обрыва вихря;
 R_{KIN} – скорость реакции по кинетической модели;
 R_{vol} – скорость горения реагентов (в том числе летучих).

ЛИТЕРАТУРА

1. International Energy Agency, 2019. Coal Information. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/coal2019MRSsum>.
2. Stigka, E.K., Paravantis, J.A., Mihalakakou, G.K. Social acceptance of renewable energy sources: A review of contingent valuation applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 32. – С.100–106.
3. Panwara, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – № 15. – С.1513–1524.
4. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
5. Khan, M.M.U.H., Jain, S., Vaezi, M., Kumar, A. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways // Waste Management. – 2016. – № 48. – С.548–564.
6. Rizwan, M., Saif, Y., Almansoori, A., Elkamel, A. Optimal processing route for the utilization and conversion of municipal solid waste into energy and valuable products // Journal of Cleaner Production. – 2018. – № 174. – С.857–867.
7. International Energy Agency, 2019. Key world energy statistics. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2019.pdf>.
8. BP, 2019. Statistical Review of World Energy. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2019/bp-statistical-review-of-world-energy-2019-full-report.pdf>.
9. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 37-2017 «Добыча и обогащение угля» // Москва. – Бюро НДТ. – 2017.

10. Touš, M., Pavlas, M., Putna, O., Stehlík, P., Crha, L. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short-term basis // *Energy*. – 2015. – № 90. – С.137–147.
11. Song, J., Song, D., Zhang, X., Sun, Y. Risk identification for PPP waste-to-energy incineration projects in China // *Energy Policy*. – 2013. – № 61. – С.953–962.
12. Faitli, J., Magyar, T., Erdélyi, A., Murányi, A. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills // *Waste Management*. – 2015. – № 36. – С.213–221.
13. Tabakaev, R., Shanenkov, I., Kazakov, A., Zavorin, A. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2017. – № 124. – С.94–102.
14. Делягин, Г.Н. Метод рационального использования высокообводненных углей путем их сжигания в виде водоугольных суспензий в топочных устройствах // *Инф. письмо № 1*. – Москва: ИГИ. – 1962. – С.11.
15. Делягин, Г.Н., Канторович, Б.В. Использование обводненных твердых топлив в виде ВУС / *Теория и технология процессов переработки топлив*. – М.: Недра, 1966. – С. 124–151.
16. Глушков, Д.О., Стрижак, П.А., Чернецкий, М.Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 10. – С.31–41.
17. Ходаков, Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 1. – С.35–45.
18. Аслянян, Г.С. Экологически чистые угольные технологии: аналитический обзор / Г.С. Аслянян. – Москва, 2004. – 66 с.
19. Energy and Air Pollution for the World Energy Outlook Special Report 2016. Paris. International Energy Agency. 2016. 266 p. <http://www.iea.org>.
20. Kumar, M.S. Studies on flow characteristics of coal-oil-water slurry system / M.S. Kumar, K. Chandna, D.D. Sankar, G. Kundu // *International Journal of Mineral Processing*. – 2006. – V. 79, № 4. – P. 217–224.

21. Глушков, Д.О. Зажигание органоугольных топливных композиций / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 460 с.
22. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management. The World Bank. Washington. – 2012.
23. Moriguchi, Y., Hashimoto, S. Material Flow Analysis and Waste Management, in: Clift, R., Druckman, A. (Eds.), Taking Stock of Industrial Ecology. Springer International Publishing. – 2015. – С.247–262.
24. Edjabou, M.E., Martín-Fernández, J.A., Scheutz, C., Astrup, T.F. Statistical analysis of solid waste composition data: Arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients // Waste Management. – 2017. – № 69. – С.13–23.
25. Peavy, H.S., Rowe, D.R., Tchobanoglous, G., Environmental engineering, McGraw-Hill, New York. – 1985.
26. Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., A.Vlasopoulos, Spencer, N. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe // Energy. – 2017. – № 141. – С.2013–2044.
27. Slack, R.J., Gronow, J.R., Voulvoulis, N. The management of household hazardous waste in the United Kingdom // Journal of Environmental Management. – 2009. – № 90(1). – С.36–42.
28. Shareefdeen, Z., Elkamel, A., Tse, S. Review of current technologies used in municipal solid waste-to-energy facilities in Canada // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2015. – № 17(7). – С.1837–1846.
29. Hla, S.S., Roberts, D. Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia // Waste Management. – 2015. – № 41. – С.12–19.
30. Onyshchenko, V.O., Bryzhan, I.A., Chevhanova, V.Y. Ecologically oriented development of Ukraine's economy: Problems and perspectives // Actual Problems of Economics. – 2014. – № 155(5). – С.261–270.

31. Namsaraev, Z.B., Gotovtsev, P.M., Komova, A.V., Vasilov, R.G. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – № 81. – C.625–634.
32. Gentil, E., Clavreul, J., Christensen, T.H. Global warming factor of municipal solid waste management in Europe // *Waste Management and Research*. – 2009. – № 27(9). – C.850–860.
33. Taherymoosavi, S., Verheyen, V., Munroe, P., Joseph, S., Reynolds, A. Characterization of organic compounds in biochars derived from municipal solid waste // *Waste Management*. – 2017. – № 67. – C.131–142.
34. Aharoni, I., Siebner, H., Dahan, O. Application of vadose-zone monitoring system for real-time characterization of leachate percolation in and under a municipal landfill // *Waste Management*. – 2017. – № 67. – C.203–213.
35. Kumar, A., Datta, M., Nema, A.K., Singh, R.K., Gurjar, B.R. Improved rating system for hazard assessment related to subsurface migration of landfill gas from municipal solid waste landfills and dumps // *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. – 2018. – № 22(3).
36. Palmiotto, M., Fattore, E., Paiano, V., Colombo, A., Davoli, E. Influence of a municipal solid waste landfill in the surrounding environment: Toxicological risk and odor nuisance effects // *Environment International*. – 2014. – № 68. – C.16–24.
37. Kravtsova, M.V., Volkov, D.A. Methodology of research for qualitative composition of municipal solid waste to select an optimal method of recycling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – № 91(1).
38. El-Fadel, M., Findikakis, A.N., Leckie, J.O. Environmental impacts of solid waste landfilling // *Journal of Environmental Management*. – 1997. – № 50(1). – C.1–25.
39. Križan, P., Matúš, M., Šooš, L., Kask, Ü., Menind, A. Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties // *Agronomy Research*. – 2011. – № 9. – C.115–123.
40. Kadir, A.A., Rahman, N.A., Azhari, N.W. The Utilization of Banana Peel in the Fermentation Liquid in Food Waste Composting // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – № 136(1).

41. Barros, R.M., Tiago Filho, G.L., Santos, A.H.M., Ribeiro, E.M., Freitas, J.V.R.D. A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste // *Renewable Energy Focus*. – 2018. – № 25. – С.4–16.
42. Об утверждении статистического инструментария для организации Росприроднадзором федерального статистического наблюдения за отходами производства и потребления [Электронный ресурс]: приказ Росстата от 28 января 2011 г. № 17 – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
43. Костюкова, Е.О. Промышленные отходы – сырье для строительных материалов будущего: Иркутский регион: научное издание // *Экология урбанизированных территорий*. – 2009. – № 4 – С.73–78.
44. Юльtimiрова, И.А. Проблемы утилизации нефтешламов // *Налоги. Инвестиции. Капитал*. – 2004. – № 1.
45. Emmi, G., Zarrella, A., Zuanetti, A., De Carli, M. Use of Municipal Solid Waste Landfill as Heat Source of Heat Pump // *Energy Procedia*. – 2016. – № 101. – С.352–359.
46. Mininni, G., Sbrilli, A., Braguglia, C.M., Marani, D., Rotatori, M. Dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons emissions from a hospital and cemetery waste incinerator // *Atmospheric Environment*. – 2007. – № 41(38). – С.8527–8536.
47. Jouhara, H., Czajczyńska, D., Ghazal, H., Reynolds, A.J., Spencer, N. Municipal waste management systems for domestic use // *Energy*. – 2017. – № 139. – С.485–506.
48. Al-Salem, S.M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., Dutta, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW) // *Journal of Environmental Management*. – 2017. – № 197. – С.177–198.
49. Ko, M.-S., Chen, Y.-L., Wei, P.-S. Recycling of municipal solid waste incinerator fly ash by using hydrocyclone separation // *Waste Management*. – 2013. – № 33(3). – С.615–620.
50. The Swedish recycling revolution. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://sweden.se/nature/the-swedish-recycling-revolution>

51. Recycle your clothes [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://about.hm.com/en/sustainability/get-involved/recycle-your-clothes.html>
52. Sheina, S., Babenko, L. Municipal solid waste management in Russia: Practices and challenges // 2014 Advanced Materials Research 864-867, с. 1989-1992. – 2014. – № 864–867. – С.1989–1992.
53. Lebersorger, S., Beigl, P. Municipal solid waste generation in municipalities: Quantifying impacts of household structure, commercial waste and domestic fuel // Waste Management. – 2011. – № 31(9–10). – С.1907–1915.
54. Bykov, D.E., Martynenko, E.G., Savelyev, A.A., Toupitsyna, O.V., Chertes, K.L. Development of territories used as landfills for municipal solid waste // Ecology and Industry of Russia. – 2016. – № 20(1). – С.8–13.
55. Mustafin, R., Malganova, I. Monitoring of illegal placement of solid waste with the use of space technology // International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. – № 8(4). – С. 24598–24607.
56. Vital Waste Graphics 3. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.en-vsec.org/publications/vitalwaste_br_1.pdf.
57. Gug, J., Cacciola, D., Sobkowicz, M.J. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics // Waste Management. – 2015. – № 35. – С.283–292.
58. Lillycrop, K.A., Costello, P.M., Association between perinatal methylation of the neuronal differentiation regulator HES1 and later childhood neurocognitive function and behavior // International Journal of Epidemiology. – 2015. – № 44(4). – С.1263.
59. Valiullin, T.R., Vershinina, K.Yu., Glushkov, D.O., Strizhak, P.A. Ignition of a Droplet of Composite Liquid Fuel in a Vortex Combustion Chamber // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 891(1).
60. Gajewski, W. Kijo-Kleczkowska, A. Leszczynski, J. Analysis of cyclic combustion of solid fuels // Fuel. – 2009. – № 88. – С.221–234.
61. Zhang, B., Luo, H., Lv, L., Wang, J., Zhang, B. Analysis of ecological environment impact of coal exploitation and utilization // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – № 121(3).

62. Sogancioglu, M., Ahmetli, G., Yel, E A Comparative Study on Waste Plastics Pyrolysis Liquid Products Quantity and Energy Recovery Potential // *Energy Procedia*. – 2017. – № 118. – C.221–226.
63. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal-water suspensions // *Fuel*. – 2011. – № 90. – C.865–877.
64. Khodakov, G.S., Gorlov, E.G., Golovin, G.S. Production and pipeline transportation of coal-water slurry fuel // *Solid Fuel Chemistry* – 2006 – № 40(4). – C.19–35.
65. Glushkov, D.O. Strizhak, P. A. Vershinina K. Yu. Hot surface ignition of a composite fuel droplet // *Matec Web of Conference* – 2015 – № 23(01063). – C. 1–4.
66. Adiga, K.C. Coal slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics // *Fuel Processing Technology*. – 1988. – № 18(1). – C.59–69.
67. Mizomoto, M. Combustion of a coal-oil mixture droplet on a hot surface // *Combustion and Flame*. – 1986. – № 63(1-2). – C.289–301.
68. Burdukov, A.P. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures // *Fuel*. – 2002. – № 81(7). – C.927–933.
69. Law, C.K. Combustion characteristics of droplets of coal/oil and coal/oil/water mixtures // *Energy*. – 1979. – № 4. – C.329–339.
70. Atal, A. Observations on the combustion behavior of coal water fuels and coal water fuels impregnated with calcium magnesium acetate // *Combustion and Flame*. – 1993. – № 93(1-2). – C.61–89.
71. Atal, A. Combustion of CWF agglomerates from pulverized or micronized bituminous coal, carbon black, and diesel soot // *Combustion and Flame*. – 1994. – № 93(4). – C.326–342.
72. Dmitrienko, M.A., Nyashina, G.S., Strizhak, P.A. Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – № 177. – C.284–301.
73. Nyashina, G.S., Vershinina, K.Yu., Dmitrienko, M.A., Strizhak, P.A. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – № 347. – C.359–370.

74. Nyashina, G.S., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – № 172. – С.1730–1738.
75. Dmitrienko, M.A., Strizhak, P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review // *Science of the Total Environment*. – 2018. – № 613-614. – С.1117–1129.
76. Dmitrienko, M.A., Nyashina, G.S., Strizhak, P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – № 338. – С.148–159.
77. Mishra D.P., Patyal A., Padhwal M. Effects of gellant concentration on the burning and flame structure of organic gel propellant droplets // *Fuel*. – 2011. – № 90(5). – С.1805–1810.
78. Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП, по субъектам РФ и видам экономической деятельности за год. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://rpn.gov.ru/opendata/7703381225-rpnstatf2tpperVEDandSUBJ>
79. Постановление № 367 от 26 сентября 2016 г. «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Кемеровской области».
80. Проект постановления Правительства Новосибирской области «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными, Новосибирской области».
81. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2016 году».
82. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2016 году».
83. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2016 году».

84. Постановление Администрации города Томска № 798/1 от 24 июля 2013 г. «Об утверждении муниципальной программы «Развитие коммунальной инфраструктуры муниципального образования город Томск на 2014–2019 годы».
85. Постановление № 477 от 21 октября 2011 г. «Об утверждении комплексной инвестиционной программы «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011–2016 годы и на период до 2020 года».
86. Галиев, М.А., Шаретдинов, Э.Ф. Экология Башкортостана. – Уфа: Изд-во «Республиканский учебно-научный методический центр Госкомитета РБ по науке, высшему и среднему профессиональному образованию», 2001. – 344 с.
87. Faitli, J., Magyar, T., Erdélyi, A., Murányi, A. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills // Waste Management. – 2015. – № 36. – С.213–221.
88. Постановление № 477 от 21 октября 2011 г. «Об утверждении комплексной инвестиционной программы «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011–2016 годы и на период до 2020 года».
89. «Об утверждении комплексной инвестиционной программы «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011–2016 годы и на период до 2020 года» (с изменениями на: 30.12.2014).
90. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Обосновывающие материалы Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Кемерово, 2018.
91. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Новосибирска до 2031 года (Актуализация на 2017 год) Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Новосибирск, 2016.
92. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Томска до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Книга 1. Существующее положение в сфере

- производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Томск, 2018.
93. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Новосибирска до 2031 года (Актуализация на 2017 год) Книга 9. Перспективные топливные балансы, Новосибирск, 2016.
 94. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Обосновывающие материалы Книга 9. Перспективные топливные балансы, Кемерово, 2018.
 95. Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., Zhang, Y. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2014. – № 64(5). – С.597–616.
 96. Chesshire, J. Relevance of energy efficiency for electricity supply // Nuclear Energy. – 1993. – № 32(5). – С.313–319.
 97. Couto, N.D., Silva, V.B., Rouboa, A. Thermodynamic evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification // Journal of Cleaner Production. – 2016. – № 139. – С.622–635.
 98. Pandey, D.S., Das, S., Pan, I., Leahy, J.J., Kwapinski, W. Artificial neural network based modelling approach for municipal solid waste gasification in a fluidized bed reactor // Waste Management. – 2016. – № 58. – С.202–213.
 99. Gikas, P. Ultra-high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthesis gas. Journal of Environmental Management. – 2017. – № 203. – С.688–694.
 100. D. Glushkov, K. Paushkina, D. Shabardin, P. Strizhak, N. Gutareva Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation // Journal of Environmental Management. – 2019. – №. 231. – С.896–904.
 101. D. Glushkov, G. Kuznetsov, K. Paushkina, D. Shabardin The main elements of a strategy for combined utilization of industrial and municipal waste from neighboring regions by burning it as part of composite fuels // Energies. – 2018. – №. 11. – С.2534.
 102. Vershinina, K., Shabardin, D., Strizhak P. Burnout rates of fuel slurries containing

- petrochemicals, coals and coal processing waste // Powder Technology. – 2019. – №. 343. – С.204–214.
103. Glushkov, D.O., Paushkina K., Shabardin, D.P., Strizhak, P.A. Environmental aspects of converting municipal solid waste into energy as part of composite fuels // Journal of Cleaner Production. – 2018. – №. 201. – С.1029–1042.
 104. Глушков, Д.О., Шабардин, Д.П., Паушкина, К.К. Характеристики зажигания капель композиционных топлив, содержащих твердые бытовые отходы // Бутлеровские сообщения. – 2018. – №. 2. – С.53–62.
 105. Шабардин, Д.П. Сравнение скоростей горения органоводоугольных топлив на основе углей разных марок и отходов их переработки // Материалы V международного молодёжного форума «Интеллектуальные Энергосистемы». – 2017. – №. 1.
 106. Шабардин, Д.П. Разработка автоматизированной системы управления процессом подготовки композиционного жидкого топлива к сжиганию в топке котла // Материалы V международного молодёжного форума «Интеллектуальные Энергосистемы». – 2017. – №. 1.
 107. Вершинина, К.Ю., Глушков, Д.О., Шабардин, Д.П., Стрижак, П.А. Условия устойчивого зажигания органоводоугольного топлива на основе углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – №2. – С.3–7
 108. Vershinina, K.Y., Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., Shabardin, D.P. Conditions of stable ignition of coal-water slurry containing petrochemicals based on carbon residue of tire pyrolysis // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – №. 53(1-2). – С.71–77.
 109. Glushkov, D.O., Shabardin, D.P., Strizhak, P.A., Vershinina, K.Yu. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition // Fuel Processing Technology. – 2016. – №. 143. – С.60–68.
 110. Alekseenko, S.V., Maltsev, L.I., Bogomolov, A.R., Chernetskiy, M.Yu., Kravchenko, I.V., Kravchenko, A.I., Lapin, D.A., Shevyrev, S.A., Lyrshchikov, S.Yu. Results of pilot-operating combustion of coal-water fuel in a low-capacity hot

- water boiler // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – №. 328(12). – C.16–28.
111. Bogomolov, A., Valiullin, T., Vershinina, K., Shevyrev, S., Shlegel, N. Igniting soaring droplets of promising fuel slurries // Energies. – 2019. – №. 12(2). – C.208.
 112. Valiullin, T.R., Strizhak, P.A., Shevyrev, S.A., Bogomolov, A.R. Ignition of an organic water–coal fuel droplet floating in a heated-air flow // Thermal Engineering. – 2017. – №. 64(1). – C.53–60.
 113. Murko, V.I., Karpenok, V.I., Senchurova, Y.A., Bogomolov, A.R., Khyamyalyainen, V.A. Results of Study of Sulfur Oxide Reduction during Combustion of Coal-Water Slurry Fuel Through use of Sulfur Capturing Agents // MATEC Web of Conferences. – 2016. – №. 72.
 114. Ansys Fluent Theory Guide. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.academia.edu/33546431/ANSYS_Fluent_Theory_Guide.
 115. Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence // London: Academic Press. – 1972. – C.169.
 116. Magnussen, B.F. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – №. 16(1). – C.719–729.
 117. Spalding, D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames // Symposium (International) on Combustion. – 1971. – №. 13(1). – C.649–657.
 118. Glushkov, D.O., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., Mathematical simulation of the ignition of coal particles in airflow // Solid Fuel Chem. – 2015. – №. 49(2). – C.73–79.
 119. Glushkov, D.O., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., Low-temperature ignition of coal particles in an airflow // Russ. J. Phys. Chem. – 2015. – №. 9(2). – C.242–249.
 120. Strizhak, P.A., Vershinina, K.Y. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // Energy. – 2017. – №. 120. – C.34–46.
 121. Antonov, D.V., Valiullin, T.R., Iegorov, R.I., Strizhak, P.A. Effect of macroscopic porosity onto the ignition of the waste-derived fuel droplets // Energy. – 2017. – №. 119. – C.1152–1158.

122. Glushkov, D.O., Zakharevich, A.V., Strizhak, P.A., Syrodoy, S.V. Effect of the Shape of an Organic Water–Coal Fuel Particle on the Condition and Characteristics of Its Ignition in a Hot Air Flow // *Russian Journal of Physical Chemistry B.* – 2016. – №. 10(6). – C.935–945.
123. Valiullin, T.R., Strizhak, P.A. Influence of the shape of soaring particle based on coal-water slurry containing petrochemicals on ignition characteristics // *Thermal Science.* – 2017. – №. 21(3). – C.1399–1408.
124. Miranda, A.I., Ferreira, J., Silveira, C., Relvas, H., Duque, L., Roebeling, P. A cost-efficiency and health benefit approach to improve urban air quality // *Sci Total Environ.* – 2016. – №. 569-570. – C.342–351.
125. Noli, F., Tsamos, P. Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant // *Sci Total Environ.* – 2016. – №. 563-564. – C.377–385.
126. Liu, W., Cai, J., Huang, C., Hu, Y., Fu, Q., Zou, Z. Associations of gestational and early life exposures to ambient air pollution with childhood atopic eczema in Shanghai, China // *Sci Total Environ.* – 2016. – №. 572. – C.34–42.
127. Wu, C., Shen, F., Li, Y., Tsao, T., Tsai, M., Chen, C. Association of short-term exposure to fine particulate matter and nitrogen dioxide with acute cardiovascular effects // *Sci Total Environ.* – 2016. – №. 569-570. – C.300–305.
128. Petrukhin, N.V., Grishin, N.N., Sergeev, S.M. Ignition Delay Time – an Important Fuel Property // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils.* – 2016. – №. 51(6). – C.581–584.
129. Zhu, M., Zhang, Z., Zhang, Y., Liu, P., Zhang, D. An experimental investigation into the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar water slurry fuels in air // *Appl Energy.* – 2017. – №. 185. – C.2160–2167.
130. Chernetskiy, M.Y., Kuznetsov, V.A., Dekterev, A.A., Abaimov, N.A., Ryzhkov, A.F. Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl // *Thermophysics and Aeromechanics.* – 2016. – №. 23(4). – C.591–602.
131. Kozlov, A.N., Svishchev, D.A., Khudiakova, G.I., Ryzhkov, A.F. A kinetic analysis

- of the thermochemical conversion of solid fuels (A review) // *Solid Fuel Chemistry*. – 2017. – №. 51(4). – C.205–213.
132. Tugov, A.N. Experience of using municipal solid waste in the energy industry (An Overview) // *Thermal Engineering*. – 2015. – №. 62(12). – C.853–861.
 133. Tugov, A.N. Prospects for the use of municipal solid wastes as secondary energy resources in Russia // *Thermal Engineering*. – 2013. – №. 60(9). – C.663–668.
 134. Tugov, A.N., Moskvichev, V.F. Making the production of electricity on the basis of solid domestic wastes more efficient // *Thermal Engineering*. – 2011. – №. 58(6). – C.471–477.
 135. Tugov, A.N., Moskvichev, V.F. Methods of reducing emissions of nitrogen oxides at thermal power plants burning solid domestic waste // *Power Technology and Engineering*. – 2009. – №. 43(1). – C.41–45.
 136. Tugov, A.N., Moskvichev, V.F., Fedorov, L.G., Sokolov, N.S. Methods for reducing emissions of dioxins and furans in flue gases at plants burning solid domestic waste // *Power Technology and Engineering*. – 2009. – №. 43(1). – C.46–51.
 137. Messerle, V.E., Mossé, A.L., Nikonchuk, A.N., Ustimenko, A.B., Baimuldin, R.V. Plasma Processing of Model Residential Solid Waste // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2017. – №. 90(5). – C.1192–1197.
 138. Messerle, V.E., Mosse, A.L., Ustimenko, A.B. Municipal Solid Waste Plasma Processing: Thermodynamic Computation and Experiment // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2016. – №. 44(12). – C.3017–3022.
 139. Murko, V.I., Sleptsov, V.V., Nekhoroshij, I.Kh. Operating experience of a boiler with a steam output of 220 t/h with coal-water fuel (CWF) in China // *Teploenergetika*. – 2003. – №. 3. – C.76.
 140. Murko, V.I., Sleptsov, V.V., Nekhoroshi, I.Kh. Operating experience of a bolier with a steam output of 220 t/h burning coal-water fuel in China // *Thermal Engineering*. – 2003. – №. 50(3). – C.258.
 141. Trubetskoi, K.N., Zaidenvarg, V.E., Kondrat'ev, A.S., Murko, V.I., Kassikhin, G.A., Nekhoroshii, I.Kh. Water-coal fuel: The results of technology development and perspectives of its utilization in Russia // *Thermal Engineering*. – 2008. – №. 55(5). –

- C.413–417.
142. Murko, V.I., Korzhov, V.M., Susloparov, D.P., Krasnoperov, V.Yu., Dzyuba, D.A. Operational experience of reception and burning of water-coal fuel in industrial boiler-house // *Ugol'*. – 2005. – №. 6. – С.36.
 143. Trubetskoj, K.N., Moiseev, V.A., Degtjarev, V.V., Kassihin, G.A., Murko, V.I. Problems of introduction of water-coal fuel in Russia // *Ugol'*. – 2004. – №. 9. – С.41–46.
 144. Murko, V., Hamalainen, V. The Development of Environmentally Friendly Technologies of Using Coals and Products of Their Enrichment in the Form of Coal Water Slurries // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – №. 21.
 145. Kortsenshteyn, N.M., Petrov, L.V. Thermodynamic analysis of the formation of sub-micron particles on the combustion of coals // *Solid Fuel Chemistry*. – 2017. – №. 51(3). – С.170–176.
 146. Kortsenshteyn, N.M., Petrov, L.V. Numerically Simulating the Parameters of Sub-micron Particles Generated in Coals Burning // *Thermal Engineering*. – 2018. – №. 65(7). – С.435–442.
 147. Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы), систематизированные по федеральным округам Российской Федерации за год [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://rpn.gov.ru/opendata/7703381225-rpnstatf2tpFO>
 148. ГОСТ 25543-2013 Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам (с Поправкой)
 149. Križan, P., Matúš, M., Šooš, L., Kask, Ü., Menind, A. Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties // *Agronomy Research*. – 2011. – №. 9. – С.115–123.
 150. Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E.R., Dominguez, I., Komilis, D., Sánchez, A. A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies // *Waste Management*. – 2018. – №. 77. – С.486–499.
 151. Lekomtsev, A., Vyatkin, K., Martyushev, D. Performance evaluation of oily waste

- treatment technology // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2018. – №. 31(3). – С.511–515.
152. Vaisman, Ya.I., Ketov, A.A., Korotaev, V.N., Krasnovskikh, M.P. On the environmental hazard of burning organic waste in the presence of chlorine compounds // Ecology and Industry of Russia. – 2018. – №. 22(9). – С.14–17.
 153. Yang, Y., Wang, J., Chong, K., Bridgwater, A.V. A techno-economic analysis of energy recovery from organic fraction of municipal solid waste (MSW) by an integrated intermediate pyrolysis and combined heat and power (CHP) plant // Energy Conversion and Management. – 2018. – №. 174. – С.406–416.
 154. Мазурин, И., Понуровская, В., Колотухин, С. Мусоросжигательный завод Hitachi — худшее решение переработки ТКО [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://regnum.ru/news/2448239>.
 155. Chernetskiy, M.Yu., Vershinina, K.Yu., Strizhak, P.A. Computational modeling of the combustion of coal water slurries containing petrochemicals // Fuel. – 2018. – №. 220. – С.109–119.
 156. Баранова, М. П. Экологически чистая технология получения водо-топливных суспензий из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 12. – С. 32–35;
 157. Баранова, М. П. Возможность использования вторичных ресурсов в технологии получения топливных водоугольных суспензий / М. П. Баранова, В. М. Екатеринчев // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 235–238.
 158. Баранова, М. П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / М. П. Баранова, В. А. Кулагин; ред. В. А. Кулагин. Красноярск: ИПК СФУ, 2011. – 160 с.
 159. Glushkov, D.O., Paushkina, K.K., Shabardin, D.P. Co-combustion of coal processing waste, oil refining waste and municipal solid waste: Mechanism, characteristics, emissions // Chemosphere. – 2020. – V. 240. – 124892.
 160. Федеральный закон от 29.12.2014 г. № 458-ФЗ О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/39278>

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акты об использовании результатов исследований

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Научно-технический центр

"Интеллектуальные энергосистемы" НИ ТПУ

Головин А.И.



Дата " 7 " 06 2019 г.

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы
Шабардина Дмитрия Павловича

Настоящий акт составлен комиссией Научно-технического центра "Интеллектуальные энергосистемы", и свидетельствует о том, что результаты диссертационной работы Шабардина Д.П. на тему «Обоснование целесообразности утилизации промышленных и бытовых отходов при сжигании в котельных установках в составе суспензионных топлив по результатам экспериментальных исследований», обладают высокой актуальностью и используются для развития технологических систем подготовки и эффективного сжигания перспективных композиционных жидких топлив (КЖТ) на основе многочисленных отходов угле- и нефтепереработки и твердых бытовых отходов, применяемых в качестве основного и дополнительного топлива в топках паровых и водогрейных котлов.

Особенно важными и интересными, по мнению членов комиссии, являются результаты экспериментальных исследований процессов инициирования горения капель КЖТ с добавлением ТБО. Применение специализированной модельной камеры сгорания позволило создать условия, обеспечивающие максимальное приближение процессам теплообмена в топках паровых и водогрейных котлов. Представленные результаты и зависимости служат хорошей базой для разработки физических и прогностических моделей эффективного сжигания КЖТ с ТБО в топках паровых и водогрейных котлов. Использование приведенных в работе рекомендаций и полученных экспериментальных данных свидетельствует о целесообразности применения КЖТ теплоэнергетике, что обуславливается их положительными экологическими, технико-экономическими и энергетическими индикаторами.

Результаты диссертационных исследований используются при выполнении инвестиционного проекта, направленного на создание первого в России опытно-промышленного участка подготовки и сжигания органоводоугольного топлива с применением промышленных и бытовых отходов. Плановые сроки реализации проекта: 2019–2021 гг.

Председатель комиссии

Руководитель группы НТЦ ИЭ НИ ТПУ

Лосев Д.В.



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШЭ НИ ТПУ

К.т.н., доцент

Матвеев А.С.

“ 22 ” мая 2019 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы

Шабардина Дмитрия Павловича

«Обоснование целесообразности утилизации промышленных и бытовых отходов при сжигании в котельных установках в составе суспензионных топлив по результатам экспериментальных исследований» в образовательном процессе, реализуемом сотрудниками Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики НИ ТПУ

Представленные в диссертационной работе аспиранта Шабардина Д.П. результаты экспериментальных исследований заслуживают внимания и приняты к рассмотрению в качестве рекомендаций по созданию технологий для эффективного сжигания композиционных жидких топлив на основе отходов угле- и нефтепереработки и твердых бытовых отходов на объектах большой и малой теплоэнергетики. Особый интерес, по мнению сотрудников НОЦ И.Н. Бутакова, представляют результаты исследований процессов горения капель и частиц сложных по составу композиционных топлив в камерах сгорания водогрейных и паровых котельных агрегатов. Экспериментально установленные нижние оценки времен задержки зажигания капель топлив позволяют (с учетом их минимальных температур зажигания, а также свойств топлива) задавать оптимальные параметры работы устройств топливоподачи и выдерживать требуемые температурные режимы теплоэнергетических установок.

Настоящий акт подтверждает, что выводы и практические рекомендации, приведенные в диссертационной работе аспиранта Шабардина Д.П., используются при разработке образовательных курсов с целью обучения студентов и магистрантов ресурсоэффективным системам и энергоэффективным технологиям сжигания композиционных топлив в топках паровых и водогрейных котлов. В частности, при разработке лекционных курсов и учебно-методических материалов для ведения дисциплин в рамках магистерских профилей автоматизации теплоэнергетических процессов и экологически чистых технологий использованы:

- экспериментальные данные по исследованию влияния размеров частиц, их формы, концентрации компонентов топливных суспензий, взаимодействия частиц между собой на характеристики зажигания и горения;

- экспериментальные данные по варьированию характеристик зажигания и горения топливных суспензий с добавками отходов;
- экспериментальные данные по исследованию газофазного и гетерогенного зажигания капель топлив в контролируемых условиях;
- результаты математического моделирования процессов сжигания суспензионных топлив на основе воды, отходов углеобогащения и твердых бытовых отходов в водогрейном котельном агрегате.

Применение полученных в диссертационной работе результатов и сформулированных рекомендаций позволяет: использовать многочисленные отходы угле- и нефтепереработки и твердые бытовые отходы в качестве компонентов для приготовления композиционных топлив; повысить как эффективность их сжигания в топках паровых и водогрейных котлов, так и надежность теплоэнергетических установок за счет реализации низкотемпературного зажигания, в том числе снижения газовых антропогенных выбросов.

Целесообразно также отметить, что результаты диссертационных исследований стали основанием для актуализации содержания дисциплин, направленных на обучение современным системам конверсии твердых топлив не только при подготовке магистрантов, но и студентов в рамках научных исследований в семестре, а также аспирантов, обучающихся по специальностям: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика, 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты, 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Руководитель НОЦ И.Н. Бутакова

д.т.н., профессор

21.05.2019

 / Заворин А.С.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ»



Сердцев В.Н.

Дата " 17 " мая 2019 г.

А К Т

о практическом использовании результатов
диссертационной работы
Шабардина Дмитрия Павловича

В результате рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы Шабардина Д.П. «Обоснование целесообразности утилизации промышленных и бытовых отходов при сжигании в котельных установках в составе суспензионных топлив по результатам экспериментальных исследований», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, комиссией в составе Каменский Д.Е. – главный инженер, Морозов В.П. – начальник электротехнической лаборатории, был составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

- результаты диссертационной работы Шабардина Д.П. признаны актуальными, полезными с практической точки зрения развития современных представлений о процессах зажигания и горения капель (частиц) перспективных композиционных жидких топлив (КЖТ) с добавлением ТБО в топках паровых и водогрейных котлов;
- полученные графические и аппроксимационные выражения были использованы при выборе энергоэффективных режимов работы энергоблоков, имеющих в распоряжении ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ»;
- сформулированные в диссертационной работе выводы использованы в виде практических рекомендаций соответствующим подразделениям ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ» с целью улучшения технологий сжигания КЖТ с добавлением ТБО и создания адекватных физических и прогностических моделей их зажигания и последующего горения в топках паровых и водогрейных котлов.

Члены комиссии:

Д.Е.Каменский

В.П. Морозов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Список публикаций по теме исследований

1. **Shabardin, D.P.** Co-combustion of coal processing waste, oil refining waste and municipal solid waste: Mechanism, characteristics, emissions / D. O. Glushkov, K. K. Paushkina, D. P. Shabardin // **Chemosphere**. – 2020. – V. 240. – 124892.
2. **Shabardin D.** Burnout rates of fuel slurries containing petrochemicals, coals and coal processing waste / K. Vershinina, D. Shabardin, P. Strizhak // **Powder Technology**. – 2019. – V. 343. – P. 204–214.
3. **Shabardin D.** Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation / D. Glushkov, K. Paushkina, D. Shabardin, P. Strizhak, N. Gutareva // **Journal of Environmental Management**. – 2019. – V. 231. – P. 896–904.
4. **Шабардин Д. П.** Характеристики зажигания капель композиционных топлив, содержащих твердые бытовые отходы / Д. О. Глушков, Д. П. Шабардин, К. К. Паушкина // **Бутлеровские сообщения**. – 2018. – Т. 53, №2. – С. 53-62.
5. **Shabardin D.** Environmental aspects of converting municipal solid waste into energy as part of composite fuels / D. Glushkov, K. Paushkina, D. Shabardin, P. Strizhak // **Journal of Cleaner Production**. – 2018. – V. 201. – P. 1029–1042.
6. **Shabardin D.** The main elements of a strategy for combined utilization of industrial and municipal waste from neighboring regions by burning it as part of composite fuels / D. Glushkov, G. Kuznetsov, K. Paushkina, D. Shabardin // **Energies**. – 2018. – V. 11. – P. 2534.
7. **Шабардин Д. П.** Условия устойчивого зажигания органоводоугольного топлива на основе углердного остатка от пиролиза автомобильных шин / К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, Д. П. Шабардин, П. А. Стрижак // **Химическое и нефтегазовое машиностроение**. – 2017. – №2. – С. 3-7 (**Shabardin D.P.** Conditions of stable ignition of coal-water slurry containing petrochemicals based on carbon residue of tire pyrolysis / K.Y. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, D.P. Shabardin // **Chemical and Petroleum Engineering**. – 2017. – V. 53. – P. 71–77).
8. **Shabardin D.P.** Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition / D.O. Glushkov, D.P. Shabardin, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // **Fuel Processing Technology**. – 2016. – V. 143. – P. 60–68.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Список докладов по теме исследований

1. Стендовый доклад на тему: «Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов соседними регионами путем сжигания в составе композиционных топлив на объектах теплоэнергетики» представленный на XXXV Сибирском теплофизическом семинаре, 29.08.2019 год, г. Новосибирск.
2. Стендовые доклады на темы: «Характеристики зажигания капель жидких композиционных топлив, содержащих ТБО, в условиях лучистого и конвективного нагрева», «Влияние состава композиционного жидкого топлива на характеристики зажигания» и «Совместное сжигание промышленных отходов в составе суспензионных топлив» представленные на XXII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 21.05.2019 год, г. Москва.
3. Устный доклад на тему: «Скорости выгорания органоводоугольных топлив из углей и отходов их обогащения», представленный на XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», 25.04.2019 год, г. Томск.
4. Устные доклады на темы: «Совместная утилизация промышленных и твердых бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив» и «Отличие характеристик зажигания разных составов органоводоугольных топлив», представленные на международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», 24.04.2019 год, г. Томск.
5. Устный доклад на тему: «Утилизация твердых бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив», представленный на Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития», 16.11.2018 год, г. Томск.

6. Устный доклад на тему: «Сравнение скоростей горения органоводоугольных топлив на основе углей разных марок и отходов их переработки» представленный на V международном молодёжном форуме «Интеллектуальные Энергосистемы» 2017 год, г. Томск.
7. Устный доклад на тему: «Разработка автоматизированной системы управления процессом подготовки композиционного жидкого топлива к сжиганию в топке котла» представленный на V международном молодёжном форуме «Интеллектуальные Энергосистемы» 2017 год, г. Томск.
8. Устный доклад на тему: «Отличие условий зажигания капель водоугольного и органоводоугольного топлива при конвективном нагреве» представленный на III международном молодёжном форуме «Интеллектуальные Энергосистемы» 2015 год, г. Томск.