

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в Инженерной школе энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Матвиенко Олег Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики, химии и теоретической механики общеобразовательного факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск;

Шторк Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «29» сентября 2020 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, дом 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук



Табакаев Роман Борисович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Интенсивное развитие мировой экономики вызывает увеличение объемов потребления энергоресурсов (рис. 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% (рис. 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 препятствует ряд причин, в частности:

- низкая удельная мощность потока энергоносителя является причиной больших габаритов и массы энергоустановок, необходимы большие удельные капитальные затраты на их сооружение (от 2 до 15 тыс. долл./кВт);
- низкий КПД энергоустановок по преобразованию первичной энергии в электричество или тепло (12–16% – фотопреобразователи, 30–40% – большинство НИЭ, 60–70% – ГЭС);
- 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.

Страны с большим запасом традиционных энергоресурсов ввели на практике программы освоения НИЭ. 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. Евросоюз в 2008 г. принял программу, согласно которой к 2020 г. доля НИЭ в балансе производства энергии должна составлять 20%. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что доля НИЭ в мировом балансе производства электроэнергии к 2050 году будет составлять 46%. Существенный прирост мощностей обусловлен

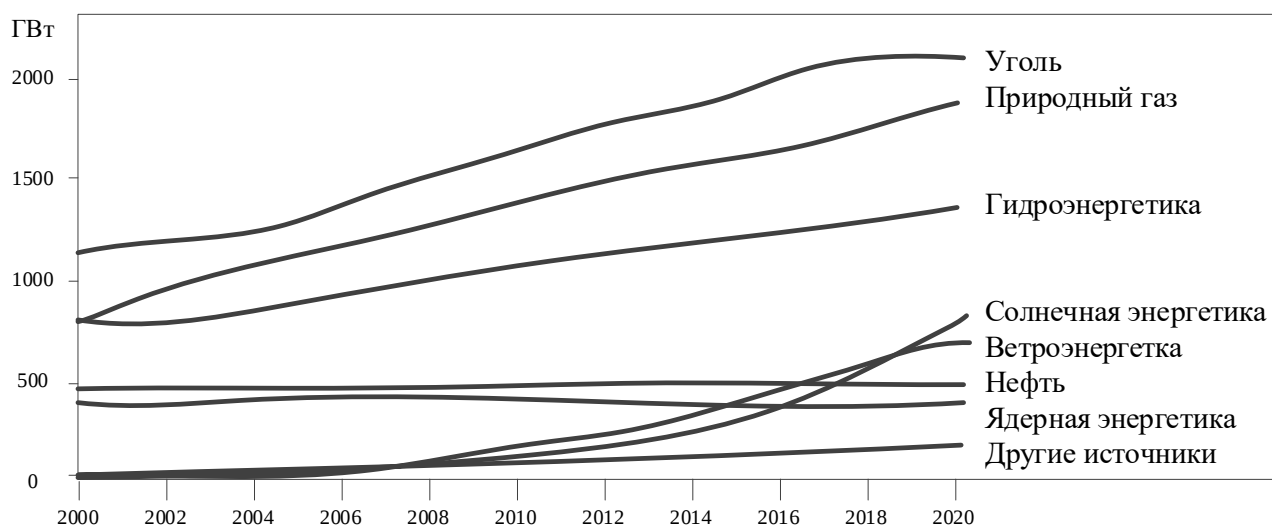


Рис. 1. Мировое производство электроэнергии
(данные International Energy Agency, 2019. Coal Information)

комплексным применением НИЭ, к которым относятся биомасса, солнце, ветер, земные недра, водотоки (малые реки, каналы), воды морей и океанов, содержащих потенциальную энергию градиентов температуры, кинетическую энергию приливов и отливов, волн и течений, а также химическую энергию градиентов солёности. В последние годы возрастает интерес к горючим коммунальным и промышленным отходам, которые имеют большой потенциал для производства энергии при их утилизации. Таким образом в Европе постепенно утверждается тенденция к отказу от угля как одного из основных источников 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 дешевой и большими запасами 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 парниковые газы, CO_x , SO_x , NO_x , HCl , летучая зола, которые оказывают негативное влияние на атмосферу. Также в процессе обогащения угля образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеков) которые занимают значительные площади и наносят вред окружающей среде. Всего при добыче и обогащении угля только за 2018 год в России было образовано 3236,6 млн т отходов. Из них 1526,9 млн т (47 %) было размещено во внешних отвалах, остальные отходы были переработаны или использованы для закладки выработанного пространства шахт и разрезов.

Вместе с тем в последнее время актуальной задачей является утилизация коммунальных отходов. Согласно мировому опыту переход от складирования и захоронения отходов к их полной переработке и повторному использованию требует реализации в среднесрочной перспективе промежуточного этапа – утилизации отходов путем сжигания с выработкой теплоты и электрической энергии. Такие мероприятия позволят утилизировать накопленные отходы, которые непригодны для повторного применения, либо повторное применение не рентабельно.

Таким образом, актуальной задачей является разработка мероприятий для полезного использования твердых коммунальных отходов с целью снижения загрузки полигонов и улучшения экологической обстановки в окрестностях этих объектов.

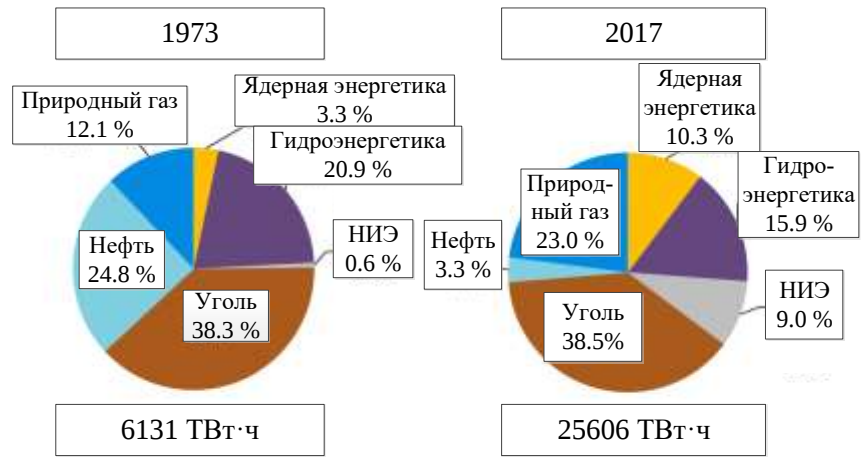


Рис. 2. Общемировая структура энергогенерации (данные International Energy Agency, 2019. Coal Information)

Таблица 1. Мировая добыча угля (за 2018 г.) (данные International Energy Agency, 2019. Coal Information)

Производство угля	млн т	%
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

Как правило, такие задачи решаются путем непосредственного сжигания диспергированной смеси исходных компонентов с получением энергии. Вследствие относительно низкой теплотворной способности твердых коммунальных отходов (ТКО) (как правило, менее 10 МДж/кг) по сравнению с традиционными углеводородными топливами (20–30 МДж/кг), а также из-за высокой концентрации вредных газов в продуктах сгорания полноценная замена углеводородного топлива горючими отходами является экономически, экологически и технически нецелесообразной.

По этим причинам, а также в условиях нестабильности объемов добычи и цен на жидкие и газообразные полезные ископаемые роль угля в теплоэнергетике с

каждым годом возрастает. По оценкам экспертов во многих странах, где расположены месторождения твердых полезных ископаемых, в ближайшие десятилетия возрастет добыча и экспорт высококачественных марок угля и собственное потребление местных низкокачественных марок угля.

Увеличение объемов потребления угля в рамках традиционных технологий сжигания, к сожалению, приведет к достаточно существенному ухудшению экологической обстановки в мире. Поэтому актуальна разработка способов снижения влияния работы угольных котельных и тепловых электростанций на окружающую среду.

Наряду с решением проблемы энергодефицита в последнее время актуальной задачей является утилизация промышленных и особенно коммунальных отходов. Согласно мировому опыту переход от складирования и захоронения отходов к их переработке и повторному использованию требует реализации в среднесрочной перспективе промежуточного этапа – утилизации отходов путем сжигания с выработкой теплоты и электрической энергии. Такие мероприятия позволят утилизировать уже накопленные отходы, которые непригодны для повторного применения. Таким образом, актуальной задачей является разработка мероприятий для полезного использования твердых коммунальных отходов с целью снижения загрузки полигонов и улучшения экологической обстановки в окрестностях этих объектов. Как правило, такие задачи решают путем непосредственного сжигания диспергированной смеси исходных компонентов с получением энергии. Однако из-за относительно низкой теплотворной способности твердых коммунальных отходов (7–10 МДж/кг) по сравнению с традиционными углеводородными топливами (20–30 МДж/кг), а также из-за высокой концентрации опасных компонентов в дымовых газах полная замена углеводородного топлива горючими отходами является экономически, экологически, энергетически и технологически нецелесообразной. Требуются новые способы хранения, переработки и использования твердых и жидких отходов.

Альтернативным вариантом решения этих проблем является применение твердых коммунальных отходов в качестве компонентов суспензионных топлив,готавливаемых на основе воды, отхода углеобогащения (или смеси низкокачественного угля с водой) и отработанной горючей жидкости (трансформаторные, турбинные, автомобильные масла и др.). Композиционные жидкие топлива (КЖТ): водоугольные (ВУТ) или органоводоугольные (ОВУТ) представляют вязкие, стабильные, экологически чистые на всех стадиях производства и использования, пожаро- и взрывобезопасные суспензии, в которых в качестве горючей основы используются энергетические, а также неэнергетические угли, угольные шламы и кеки с концентрацией твердых веществ не менее 50 %. Процесс сжигания композиционного топлива характеризуется повышенными комплексными экологическими и технико-экономическими показателями по сравнению с процессом сжигания твердого натурального топлива. Причиной этого являются высокая полнота (соответственно, малый недожог) сгорания топлива за счет низкотемпературной реакционной способности на стадии воспламенения и интенсификации процесса горения при взаимодействии углерода топлива с водяным паром, протекающим параллельно с основной реакцией окисления. Композиционное топливо характеризуется не только высокими температурами горения, соизмеримыми с температурами горения твердого натурального топлива, но и относительно низким содержанием вредных веществ в дымовых газах, вследствие их взаимодействия с водяными парами.

Выполненный сравнительный анализ показал, 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 ТКО и обеспечить экономию исчерпаемых углеводородных топлив, которые сжигаются для производства электрической энергии и теплоты на тепловых электрических станциях. Основными компонентами ТКО являются: бумага и картон в количестве 25–30% от общего объема отходов; органические отходы (включая пищевые) – 26–35%; металл и стекло – 5–12%; пластик – 7–10%; древесина, текстиль и резина – по 2–4% каждого. Таким образом, содержание энергетических фракций (картон, бумага, дерево, текстиль, полимерные отходы) составляет около 80% от общего объема твердых коммунальных отходов.

Цель диссертационной работы – обоснование возможности использования ТКО 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 решались следующие задачи:

1. Анализ современного состояния исследований и технических решений в области утилизации ТКО в России и мире. Выявление факторов, препятствующих эффективной утилизации ТКО. Разработка способа решения проблемы на основе экологически, экономически и энергетически выгодного сжигания суспензий с ТКО.
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 доминиру-

ющим механизмом нагрева. Приготовление перспективных суспензий КЖТ из отходов угле- и нефтепереработки с добавлением твердых коммунальных отходов. Анализ сырьевой базы для развития технологий сжигания КЖТ с ТКО при учете энергетических, экологических и экономических факторов, типичных для котельных установок большой и малой энергетики. Определение параметров работы стендов, соответствующих условиям устойчивого зажигания капель перспективных для топок водогрейных и паровых котлов суспензий КЖТ. Изучение возможных режимов зажигания КЖТ, а также необходимых параметров для их эффективной реализации.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепло- и массопереноса при горении капель КЖТ с ТКО. Определение влияния группы основных факторов (температура и скорость потока нагретого газа, размеры частиц, их форма, концентрация компонентов суспензий КЖТ, взаимодействие частиц между собой) на характеристики (времена задержки и пороговая температура) зажигания КЖТ. Получение соответствующих зависимостей и аппроксимационных выражений. Прогнозирование по результатам экспериментов эффективных условий зажигания КЖТ в топочных камерах котельных установок большой и малой энергетики. Выделение перспективных добавок из числа промышленных и коммунальных отходов в КЖТ для варьирования в широких диапазонах интегральных характеристик их зажигания и горения. Изучение характеристик горения композиционного топлива с варьируемым составом в разных условиях нагрева для обоснования возможности протекания процесса горения в условиях, характерных для топок котлоагрегатов.

4. Анализ структуры, объемов и энергетического потенциала для наиболее широко распространенных ТКО, низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки. Разработка концепции вовлечения перспективных композиционных топлив из низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки, ТКО 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 ТКО 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 ТКО, низкосортных углей, отходов углеобогащения и нефтепереработки. Продемонстрированы высокие значения относительных экологических, экономических и энергетических индикаторов сжигания КЖТ с ТКО в сравнении с традиционным пылевидным сжиганием угля. Разработана стратегия практической реализации совместной утилизации промышленных и твердых коммунальных отходов с выработкой теплоты и электрической энергии. 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 можно прогнозировать условия их эффективного применения в качестве основного (вместо угля, мазута или газа) или дополнительного (при розжиге) топлива водогрейных и паровых котлов 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 ТКО, а также в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке специалистов (магистратура, аспирантура) в области экологически чистых топливных технологий.

Достоверность результатов диссертационных исследований подтверждается выполненными оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием современных высокоточных методов и программно-аппаратных комплексов, удовлетворительной корреляцией полученных данных с известными результатами исследований других авторов и результатами решения тестовых задач.

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.), 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, ТКО 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.).

Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в РФ «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам

развития («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»).

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. При использовании ТКО в составе суспензионных топлив возможно существенное сбережение энергетических ресурсов при сохранении высоких энергетических характеристик котельных агрегатов. Теплота сгорания суспензий с ТКО может достигать 11-15 МДж/кг. Максимальное отличие времен задержки зажигания КЖТ с добавлением и без ТКО 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 ТКО, 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 ТКО ниже на 15–60 % по сравнению со сжиганием КЖТ без добавления ТКО.

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 ТКО.

4. Относительные показатели (с учетом экологических, энергетических и экономических индикаторов) суспензионных топлив с добавлением ТКО выше в 1.5–3 раза по сравнению с шламами и кеками без ТКО, 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 ТКО 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.

Личный вклад автора состоит в формулировке цели и задач диссертации, планировании экспериментальных исследований, разработке методик исследований, проведении опытов, обработке их результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, апробации результатов, выполнении математического моделирования процессов сжигания перспективных КЖТ в условиях, соответствующих топкам котельных установок большой и малой энергетики и недоступных в полной мере при проведении экспериментов в лаборатории, анализе и обобщении экспериментальных и теоретических результатов исследований, разработке рекомендаций использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2015),

Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015, 2017), 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 объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований, содержит 47 рисунков, 20 таблиц, 166 страниц.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, их достоверность, апробация, личный вклад автора.

В первой главе проанализированы современные технологии производства электрической энергии и тепла, а также состояние научных исследований в области утилизации твердых коммунальных отходов (в том числе с выработкой теплоты и электрической энергии), известные способы и конструкции основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций, котельных и мусоросжигательных заводов. Выявлены достоинства и недостатки известных технологических решений. В целом за последние 25–30 лет разработана группа подходов к утилизации ТКО. Существенный вклад внесли известные специалисты, в частности: Тугов А.Н., Москвичев В.Ф. (исследовавшие взаимосвязанные физико-химические процессы и разрабатывающие технологии энергетической утилизации коммунальных отходов на ТЭС); Мессерле В.Е., Моссэ А. Л., Устименко А. Б. (разрабатывающие технологии плазменной газификации ТКО с использованием кислородной неравновесной плазмы); Алексеенко С.В., Аньшаков А. С. (разрабатывающие электроплазменные системы для переработки или газификации органических отходов производительностью 10–20 кг/ч с получением синтез-газа – топливного газа) и др.

Кроме этого разработаны экспериментальные методики, физические и математические модели горения ТКО в различных условиях. Однако использование установок и полученных экспериментальных данных затруднено низкой рентабельностью практически всех существующих решений.

Минимальные затраты на внедрение должны стать определяющим фактором в ходе использования ТКО для получения теплоты и электрической энергии. Поэтому способ утилизации ТКО в составе композиционных топливных суспензий является весьма перспективным. За последние 25–30 лет разработаны научные основы технологий сжигания КЖТ в модельных камерах и топках энергетических котлоагрегатов. Наибольший вклад внесли известные специалисты: Алексеенко С.В., Баранова М.П., Богомоллов А.Р., Бурдуков А.П., Ведрученко В.Р., 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., Саломатов В.В., Стрижак П.А., Шевырев С.А., Цепенков А.И., Федорова Н.И., Федяев В.И., Ходаков Г.С., Чернецкий М.Ю., Gajewski W., Hu B., Kefa C., Kijo-Kleczkowska A., Kim S.H., Lee C.H., Liu J., Liu H., Manwani P., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Svoboda K., Sakai T., Wang H., Zhu M. Разработаны уникальные экспериментальные методики, перспективные физические и математические модели. Получены зависимости интегральных характеристик зажигания и горения КЖТ от основных параметров процесса. В большинстве публикаций по тематике КЖТ горючей основой для суспензий являются энергетические угли в пылевидном состоянии либо отходы и обогащения и переработки. Исследования экологических характеристик сжигания водоугольных топлив с добавками ТКО освещены не в полной мере. Не сформирована база экологических характеристик сжигания органоводоугольных топлив с добавками ТКО. Не установлено влияние основных компонентов ТКО на характеристики зажигания и горения перспективных топливных суспензий. Это сдерживает обоснование целесообразности добавления ТКО в ВУТ и ОВУТ для минимизации негативного влияния ТКО на окружающую среду.

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

Исследования выполнены с группой составов композиционного топлива на основе фильтр-кеков коксующегося каменных углей, полученных с обогащательных фабрик. Такие горючие отходы являются побочными продуктами углеобогащения, которые могут широко применяться в теплоэнергетике в качестве топлива. Фильтр-кек представляет смесь мелкодисперсного угля (размер частиц не более 80 мкм) и воды (массовая концентрация около 50%). Как правило, на углеобогащательных фабриках фильтр-кек складывают на открытых полигонах. Это ведет к загрязнению больших территорий угольной пылью и ухудшению экологической обстановки территорий.

Для приготовления рассматриваемых в данной работе составов композиционного жидкого топлива применялась следующая методика. Типичные твердые коммунальные отходы (картон, древесина, резина, пластик) измельчались отдельно

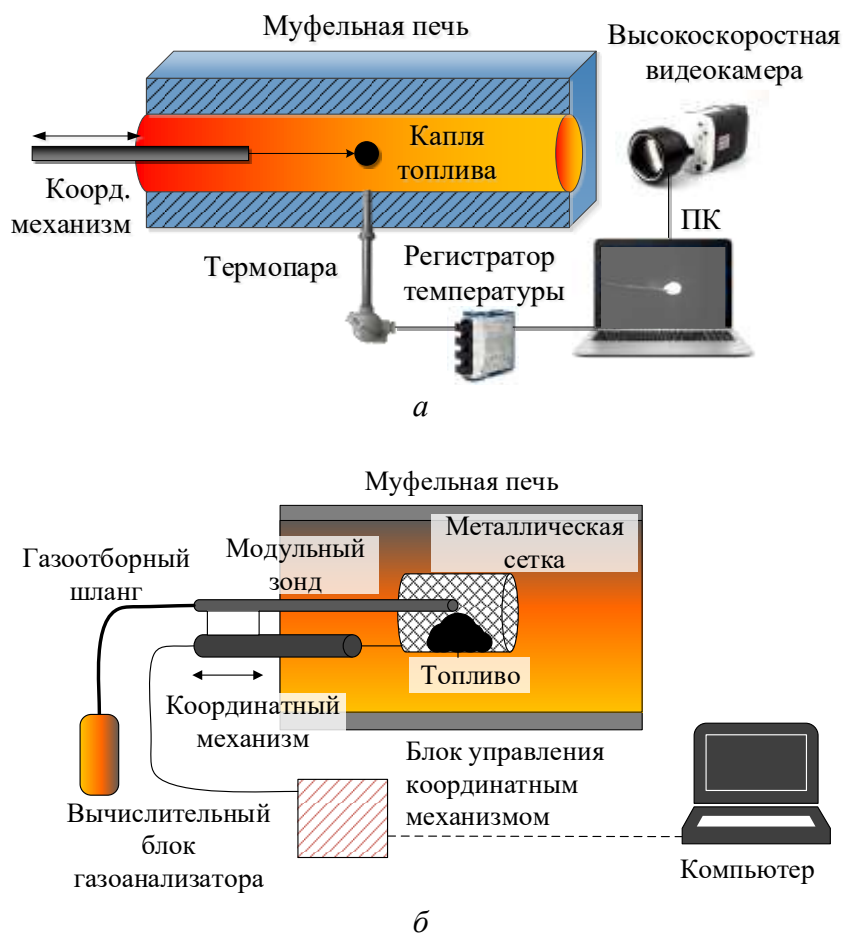


Рис. 3. Схемы экспериментальных стендов для измерения процессов зажигания (а) и антропогенных выбросов (б) [1]

и горения капель композиционных топлив исследованы с использованием экспериментального стенда (рис. 3а). Зажигание капель топлива происходило в высокотемпературной неподвижной воздушной среде, которая генерировалась в объеме полый керамической трубки (внутренний диаметр 50 мм, длина 500 мм) муфельной печи Loiplf50/500-1200. Диапазон варьирования температуры 20–1200 °С, задаваемые значения контролировались встроенной термопарой с НСХ ХА. Температуры в окрестности верхнего предела указанного диапазона характерны для процессов сжигания топлива в топках котлов. В сериях из 5–7 экспериментов, проводимых при идентичных начальных условиях, печь прогревалась до заданной температуры. После ее стабилизации (± 2 °С) капля топлива размером (диаметр) около 2 мм генерировалась электронным дозатором (диапазон 1–10 мкл, шаг варьирования 0.1 мкл) Finnpipe Novus и осаждалась на держатель, который вводился в печь при помощи координатного механизма СПШ20-23017/2000Z через одно из торцевых отверстий керамической трубки печи вдоль ее оси симметрии. Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались цветной высокоскоростной видеокамерой Phantom V411. Ее основные характеристики: скорость съемки 4200 кадров в секунду, максимальное разрешение 1280×800 пикселей; минимальное время экспозиции 1 мкс.

при помощи мельницы. Полученная крошка просеивалась через сито со стандартным размером ячеек 140 мкм. Таким образом, для приготовления топливных составов использовались компоненты (фильтр-кек и ТКО) с аналогичными размерами частиц. Далее для проведения экспериментов готовились две группы топливных составов. Первая группа составов получалась перемешиванием кека и ТКО. Вторая группа составов состояла из кека, ТКО и отработанного турбинного масла. Также эксперименты проводились с базовыми составами: кек без добавления каких-либо компонентов, смесь кека и отработанного турбинного масла.

Процессы зажигания

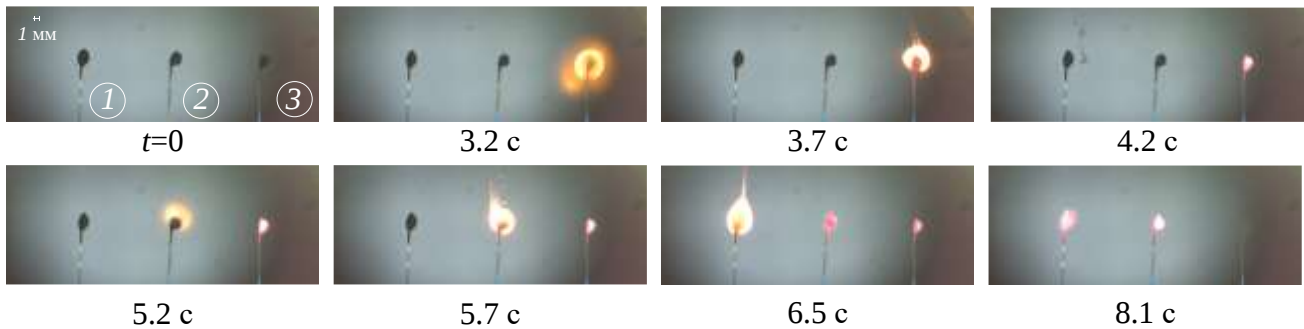


Рис. 4. Кадры процессов зажигания и горения капель композиционного жидкого топлива при $t_g \approx 800$ °С [1]: № 1 – кек 100 %; № 2 – кек 90 %, отработ. турбинное масло 10%; 3 – кек 70 %, отработ. турбинное масло 10%, ТКО (пластик) 20%

При проведении серий из 5 экспериментов в идентичных условиях контролировались температура (t_g) разогретого воздуха в печи и начальный размер (D_d) капли. Программно-аппаратный комплекс высокоскоростной видеорегистрации позволял проводить детальный анализ закономерностей процессов зажигания и выгорания топлива, 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. Систематические погрешности определения времен τ_d не превышали 3%. Случайные погрешности для серий экспериментов, проведенных при идентичных условиях, составляли не более 10%. Для анализа концентрации вредных газов в газообразных продуктах сгорания топлива использовался газоанализатор Testo 340, который монтировался вместо высокоскоростной видеокамеры.

В третьей главе приведены результаты выполненного изучения характеристик инициирования горения капель КЖТ в потоке разогретого воздуха в модельной камере сгорания, а также технико-экономических и экологических исследований. На рис. 4 приведены кадры полученных видеозаписей, иллюстрирующие протекание процессов зажигания и горения капель композиционных жидких топлив. Установлено, что закономерности исследуемых процессов для разных составов топлива с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 20% (№ 2), а также с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 20% и отработанного турбинного масла в количестве 10% (№ 3) аналогичны закономерностям процессов зажигания и горения исходного кека (№ 1). Полученный результат объясняется определяющим влиянием этого компонента на закономерности протекания физико-химических процессов при нагревании топлива.

Отличие исследуемых процессов для составов № 1–3 заключается в разной длительности отдельных стадий горения. Установлено, что интенсивность процесса зажигания для этих составов возрастает в следующей последовательности: с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 20% и отработанного турбинного масла в количестве 10%, только с добавлением типичных твердых коммунальных отходов в количестве 20% и исходный кек. Полученный результат объясняется меньшим содержанием влаги в составе топлива при добавлении твердых коммунальных отходов по сравнению с составом № 1, а также присутствием горючей жидкости. 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 не только гетерогенный, но и газофазный режим горения.

На рис. 5 приведены температуры капель разных составов композиционного топлива в процессе их зажигания и горения. Значения этих температур измерены в центре капли. Действительное значение температуры в процессе горения композиционного топлива выше, т.к. наиболее интенсивно процесс экзотермического реагирования протекает в газовой среде в окрестности капли. Результаты предварительного исследования позволяют предположить, что максимальные значения температуры в процессе горения превышают на 100–200 °С соответствующие значения на рис. 5. При температурах более 1300 °С продукты экзотермического реагирования ТКО разлагаются до простейших веществ, не представляющих опасность для окружающей среды. Это является ключевым преимуществом совместной утилизации ТКО, отработанных масел и отходов углепереработки.

При относительно высоких температурах (более 700 °С) воздуха в муфельной печи условия прогрева, зажигания и горения вводимой в нее капли топлива соответствуют условиям протекания аналогичных процессов в топке котла. Выделены следующие основные стадии взаимосвязанных физико-химических процессов: инертный прогрев, испарение влаги из приповерхностного слоя, термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и ТКО), смешение горючих газов с окислителем, воспламенение газовой смеси и ее выгорание, прогрев твердого горючего остатка, его гетерогенное зажигание и горение. На кадрах видеogramм исследуемых процессов видно (рис. 4), что в момент газофазного зажигания τ_d горючая газовая смесь, формирующаяся в окрестности капли, имеет сферическую форму. Размер этой смеси эквивалентен 2–3 размерам капли топлива. Размер формирующейся газовой зоны (до момента зажигания) в окрестности капли топлива тем больше, чем больше компонентов с высоким содержанием летучих входит в состав

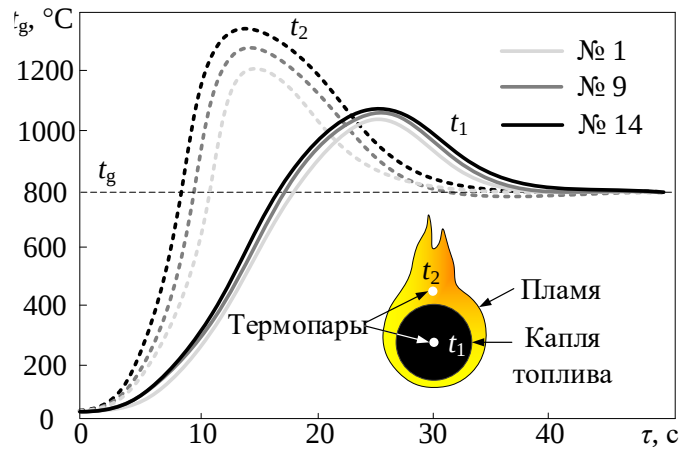


Рис. 5. Изменение температуры капель композиционного топлива ($D \approx 2$ мм) при его зажигании и горении ($t_g \approx 800$ °С) [1]: № 1 – кек 70 %, отработ. турбинное масло 10%, ТКО 20%; № 2 – кек 90 %, отработ. турбинное масло 10%; № 3 – кек 100 %

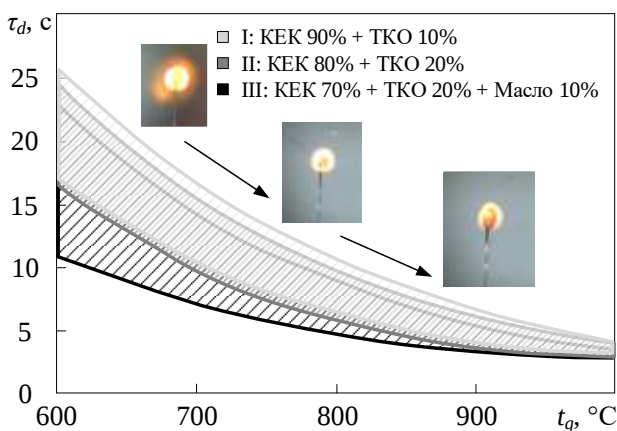


Рис. 6. Области (заштрихованы) времен задержки зажигания разных составов композиционного топлива в широком диапазоне варьирования температуры окружающей среды [1]

о окислителем, воспламенение газовой смеси и ее выгорание, прогрев твердого горючего остатка, его гетерогенное зажигание и горение. На кадрах видеogramм исследуемых процессов видно (рис. 4), что в момент газофазного зажигания τ_d горючая газовая смесь, формирующаяся в окрестности капли, имеет сферическую форму. Размер этой смеси эквивалентен 2–3 размерам капли топлива. Размер формирующейся газовой зоны (до момента зажигания) в окрестности капли топлива тем больше, чем больше компонентов с высоким содержанием летучих входит в состав

топлива и чем меньше температура окружающей среды.

На рис. 6 показаны диапазоны изменения основной характеристики процесса (τ_d) в условиях гарантированного зажигания разных составов композиционного топлива при варьировании температуры окружающей среды $t_g=600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$. Результаты (рис. 6) позволяют сделать вывод, что температура окружающей среды $600\text{ }^\circ\text{C}$ является минимальной, необходимой для инициирования процесса горения композиционного топлива на основе отходов углеобогащения, ТКО и горючей жидкости. Максимальное отличие τ_d для составов с разными компонентами составляет менее 20% при температурах окружающей среды $600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$. Также установлено, что при температурах воздуха более $1000\text{ }^\circ\text{C}$ интенсивность процессов, протекающих в течение индукционного периода настолько высока, что тепломассоперенос в капле и ее окрестностях оказывает менее существенное влияние на характеристики зажигания, чем при температурах $t_g=600\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$. При $t_g>1000\text{ }^\circ\text{C}$ времена задержки зажигания для одного и того же состава топлива отличаются не существенно.

В результате выполненных исследований установлено, что добавление отработанных масел в состав композиционных топлив на основе отходов углереперботки, а также твердых коммунальных отходов приводит к интенсификации горения топлива. Это обуславливает возможность использования композиционных топлив на объектах промышленной теплоэнергетики, причем добавление ТКО в состав основного топлива позволит уменьшить объемы его потребления без ухудшения энергетических характеристик технологического процесса.

Зависимости скорости горения капель ВУТ и ОВУТ от их размеров приведены на рис. 7 для следующих составов: ВУТ1 – 55% уголь коксующийся, 45% вода, ВУТ2 – 100% влажный фильтр-кек коксующегося угля, ВУТ3 – 55% уголь слабоспекающийся, 45% вода, ВУТ4 – 100% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля, ОВУТ1 – 50% уголь коксующийся, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло, ОВУТ2 – 90% влажный фильтр-кек коксующегося угля, 10% отработанное

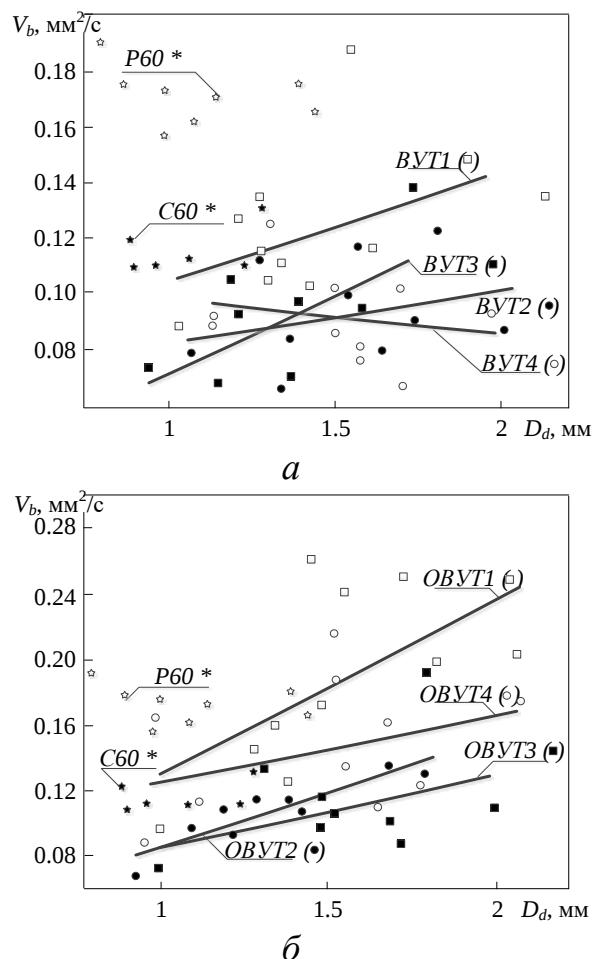


Рис. 7. Типичные скорости горения капель исследованных композиций ВУТ (а) и ОВУТ (б) при варьировании размеров капель и температуре в камере сгорания $t_g \approx 800\text{ }^\circ\text{C}$, (* – данные из Zhu M, Zhang Z, Zhang Y, Liu P, Zhang D. An experimental investigation into the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar water slurry fuels in air // Appl Energy. – 2017. – №. 185. – С.2160–2167) [2]

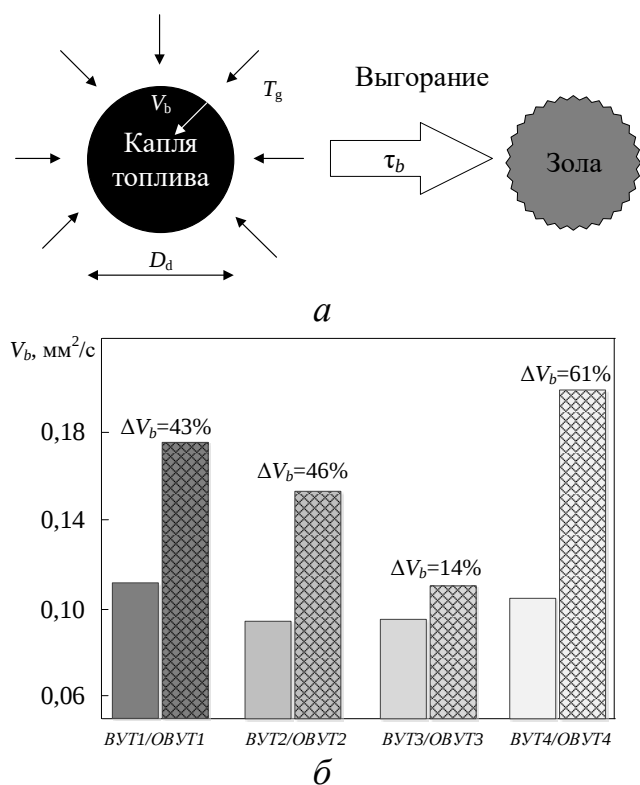


Рис. 8. *a* – схема вычисления скорости горения капли топливной суспензии; *б* – сравнение скоростей горения капель ВУТ и ОВУТ ($D_d \approx 1.4$ мм, $t_g \approx 800$ °С) [2]

(рис. 7б) по сравнению с ВУТ (рис. 7а). Этот результат обусловлен влиянием скоростей испарения жидкого горючего компонента на условия формирования горючей парогазовой смеси вблизи поверхности капли топлива. Зависимости скоростей выгорания 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 от 1 до 2 мм.

Рис. 8б иллюстрирует отличия скоростей горения капель ВУТ и ОВУТ разных составов. Во всех случаях добавление отработанного нефтепродукта приводило к ускорению выгорания. Отличие достаточно существенное и может достигать 50–60%. Самыми высокими скоростями горения обладают составы ОВУТ на основе коксующегося угля, а также на основе отхода обогащения слабоспекающегося угля. Высокие скорости сгорания достигаются за счет эффекта взрывного зажигания (с интенсивной фрагментацией капли) и горения, способствующего лучшему взаимодействию с окислителем.

Анализ концентраций антропогенных газовых выбросов при сжигании композиционного топлива выполнен для двух основных компонентов: NO_x и SO_x (рис. 9). Концентрация оксидов углерода в дымовых газах при сжигании топлива с разными компонентами из числа типичных ТКО отличается менее существенно. Анализ состава газообразных продуктов сгорания топлива выполнен с использованием экспериментального стенда (рис. 3б). Газоанализатор Testo 340 монтировался на

турбинное масло, ОВУТ3 – 50% уголь слабоспекающийся, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло, ОВУТ4 – 90% влажный фильтр-кек слабоспекающегося угля, 10% отработанное турбинное масло, Р60 – уголь коксующийся (Китай), С60 – уголь слабоспекающийся (Китай). Для вычисления скорости горения использовались схема (рис. 8а) и формула ($V_b = D_d^2 / \tau_b$), где V_b – скорость горения, D_d – диаметр капли, τ_b – время полного сгорания. Для определения скорости горения топлива можно использовать и другие схемы, однако точки зрения трудоемкости вычислений подход можно считать одним из наиболее рациональных. Скорость горения исследованных в других работах суспензий практически не зависела от размера капель и контролировалась, в основном, диффузией кислорода к топливу. В настоящей работе скорости горения ОВУТ более существенно зависят от размеров капель

стенде вместо высокоскоростной видеокамеры. Образец топлива массой 1 г вводился в муфельную печь, предварительно разогретой до заданной температуры. 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.

В соответствии с анализом элементного состава компонентов топлива, можно отметить что 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 о том, 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 рис. 9, хорошо соответствуют данным элементного состава компонентов топлива. 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 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

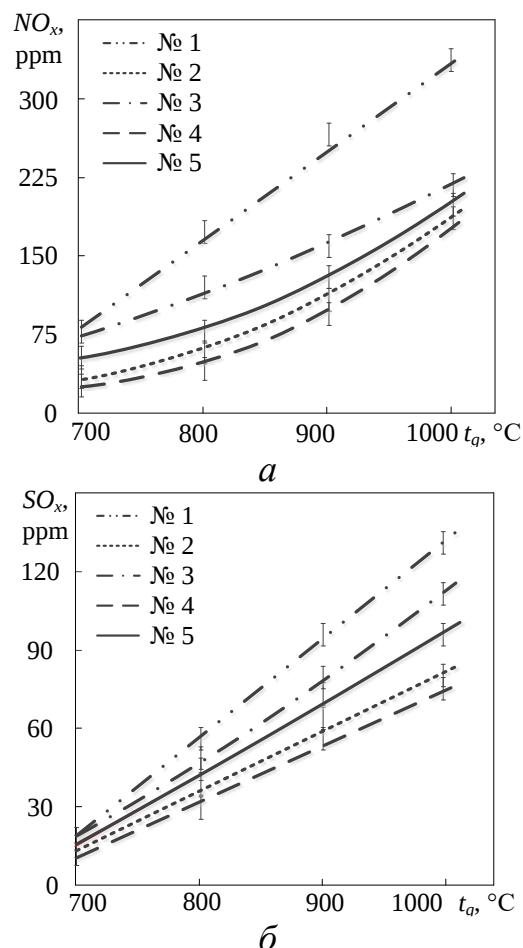


Рис. 9. Зависимость концентрации NO_x (а) и SO_x (б) в газообразных продуктах сгорания топлива от температуры воздуха, при которой происходило инициирование процесса горения: № 1 – кек 100 %; № 2 – кек 90 %, древесина 10 %; № 3 – кек 90 %, резина 10 %; № 4 – кек 90 %, пластик 10 %; № 5 – кек 90 %, картон 10 % [5]

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 (рис. 9), соответственно.

В ходе сравнения экологических характеристик топлива учитывалось то, что масса зольного остатка от КЖТ будет меньше чем при использовании в качестве топлива угля, главным образом из-за присутствия в составе КЖТ воды. Поэтому масса сжигаемого топлива КЖТ бралась больше чем масса чистого угля при тех же условиях, в соответствии с составом КЖТ. Масса образующейся золы рассчитывалась на основании данных о зольности топлива и его рассчитанной массе. При увеличении расхода (для выработки идентичного угля количества энергии) водоугольных суспензии на основе фильтр-кека масса зольного остатка может увеличиться на более чем 40% в сравнении со сжиганием угля. За счет высокого содержания золы в своем составе и большей массы объем золы, образующейся при сжигании, в 2.2 раз выше, чем у угля. Для органомоугольных топлив относительный показатель по золе не столь высокий, ее выход увеличился в 1.4–1.6 раз. Введение в состав топлива жидких горючих компонентов позволяет уменьшить недожог. В этом проявляется одно из преимуществ ОВУТ по сравнению с ВУТ. В свою очередь, использование опилок в составе ОВУТ позволяет снизить пороговую (минимальную) температуру устойчивого зажигания и повышает максимальную скорость горения топлива, что приводит к лучшему выгоранию топлива и снижению недожога.

В четвертой главе приведены результаты моделирования горения исследуемых составов с помощью современных программ для моделирования тепловых процессов, а также приведены сравнения полученных результатов с экспериментами (расхождение составило не более 10%). Геометрия модели основана на реально существующем котле. На используемой 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 ТКО (за основу взят пластик). Определено что для исследуемого котла заданной геометрии оптимальным расходом воздуха является $0.25 \text{ м}^3/\text{с}$, оптимальным расходом топлива является 0.09 кг/с , а увеличение концентрации ТКО выше 20 % приведет к неэффективному (по экологическим, энергетическим и экономическим комплексным показателям) горению топлива. С использованием разработанной модели изучено влияние на характеристики сжигания КЖТ с ТКО и без добавок группы факторов, которые сложно исследовать при проведении экспериментов в лаборатории: концентрации разных типов ТКО с целью поиска оптимального значения; температурный режим в камере сгорания котельного агрегата (низко-, средне- и высокотемпературный); коэффициент избытка воздуха; тонина помола отходов; схемы подачи смеси «суспензионное топливо – воздух».

В пятой главе разработана стратегия совместной утилизации промышленных и коммунальных отходов путем сжигания в составе композиционных топлив на объектах теплоэнергетики. Энергетический потенциал трех соседних регионов: Кемеровская область, Новосибирская область, Томская область за счет накопленных и ежегодно производимых отходов представлен в таблице 2. Можно сделать

Таблица 2. Энергетический потенциал каждого региона за счет накопленных и ежегодно производимых отходов [6]

	Накоплено		Прирост в год	
	G^0 , тонн	Q^0 , Дж	G , тонн	Q , Дж
Кемеровская область				
Кек	$368.8 \cdot 10^6$	$548.5 \cdot 10^{16}$	$8.1 \cdot 10^6$	$12.1 \cdot 10^{16}$
ТКО	$54 \cdot 10^6$	$76.1 \cdot 10^{16}$	$0.9 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^{16}$
Н/п	—	—	$0.5 \cdot 10^3$	$0.9 \cdot 10^{13}$
Новосибирская область				
Кек	$5.8 \cdot 10^6$	$8.6 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^6$	$0.6 \cdot 10^{16}$
ТКО	$70 \cdot 10^6$	$83 \cdot 10^{16}$	$1.3 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^{16}$
Н/п	$97.3 \cdot 10^3$	$0.4 \cdot 10^{16}$	$0.7 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^{13}$
Томская область				
Кек	—	—	—	—
ТКО	$21 \cdot 10^6$	$20.9 \cdot 10^{16}$	$0.4 \cdot 10^6$	$0.2 \cdot 10^{16}$
Н/п	$2.2 \cdot 10^6$	$9.8 \cdot 10^{16}$	$11.5 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^{16}$
Общие данные для трех регионов				
Кек	$374.6 \cdot 10^6$	$557.1 \cdot 10^{16}$	$8.5 \cdot 10^6$	$12.7 \cdot 10^{16}$
ТКО	$145.0 \cdot 10^6$	$180 \cdot 10^{16}$	$2.6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{16}$
Н/п	$2.3 \cdot 10^6$	$10.2 \cdot 10^{16}$	$12.7 \cdot 10^3$	$0.2 \cdot 10^{16}$

восибирская область – $7.149 \cdot 10^3$ тонн, Томская область – $403 \cdot 10^3$ тонн). При сжигании такого количества угля выделяется около $21.7 \cdot 10^{16}$ Дж теплоты. Эта энергия с учетом КПД тепловых электрических станций около 70 % преобразуется в электричество и тепло. Низкий КПД станций является причиной того, что достаточно большое количество энергии, выделяющейся в результате сжигания высококачественного угля, безвозвратно теряется в процессе преобразования. Таким образом, высококачественное твердое топливо используется нерационально. Замена угля на КЖТ из отходов углеобогащения (или низкокачественного угля), ТКО, отработанных масел (или горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки) позволит снизить расход высококачественных ископаемых топлив.

Суммарная энергия (около $21.7 \cdot 10^{16}$ Дж), генерируемая угольными тепловыми электрическими станциями и котельными, 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 энерговыделению количеством композиционного топлива потребность в его компонентах в первый год составит: $11.13 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кека; $1.31 \cdot 10^6$ тонн ТКО; $0.65 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. 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. Расход компонентов, используемых для приготовления композиционного топлива, также будет расти. Лимитирующим компонентом для

вывод о том, что уже накопленные и ежегодно производимые промышленные отходы и ТКО имеют достаточно высокий уровень энергетического потенциала. Поэтому в перспективе такие отходы могут быть использованы для удовлетворения потребностей в энергоресурсах при выработке энергии угольными тепловыми электрическими станциями.

Ежегодный расход высококачественного угля, затрачиваемого угольными тепловыми электрическими станциями и котельными трех регионов для производства теплоты и электрической энергии, составляет около $10.216 \cdot 10^3$ тонн (Кемеровская область – $2.664 \cdot 10^3$ тонн, Но-

приготовления такого состава композиционного топлива в среднесрочной перспективе является горючая жидкость. После четырех лет реализации предполагаемой энергетической программы все накопленное отработанное масло или жидкие горючие отходы нефтепереработки будут полностью утилизированы, а их ежегодное производство не будет покрывать необходимые для приготовления топлива потребности. Поэтому, начиная с пятого года в состав композиционного топлива будет входить 85 % фильтр-кека и 15 % ТКО. Ежегодная потребность в компонентах топлива составит: не менее $11.5 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кек и не менее $2 \cdot 10^6$ тонн ТКО.

В течение 25 лет реализации энергетической программы будет утилизировано $314.39 \cdot 10^6$ тонн фильтр-кека; $52.82 \cdot 10^6$ тонн ТКО; $2.66 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. Предлагаемые мероприятия позволят полностью 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 и на 36 % уменьшить количество накопленных и не переработанных до 2020 года ТКО.

Основные результаты и выводы

1. На примере рассмотренных составов композиционного топлива (фильтр-кек с добавками древесины, пищевых отходов, пластика, картона) экспериментально обоснована устойчивость зажигания и выгорания капель топлива до полного выгорания в условиях, характерных для топок котельных установок большой и малой энергетики. Установлено, что температура в камере сгорания около 450°C является минимальной, необходимой для устойчивого зажигания исследованных КЖТ. Интенсивность процесса зажигания для рассмотренных составов возрастает в следующей последовательности при добавлении компонентов в кек: древесина, резина, пластик, картон. Установлена область времен задержки гарантированного (устойчивого) зажигания капель размерами около 1 мм рассмотренных составов композиционного топлива в широком диапазоне варьирования температуры окружающей среды $600\text{--}1000^\circ\text{C}$. 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 ($600\text{--}700^\circ\text{C}$). При температурах окружающей среды более 900°C 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 КЖТ.

2. При добавлении ТКО 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 топлив составляет около 60% и 35%, соответственно. В абсолютных единицах измерения эти отличия составляют около 110 ppm и 45 ppm, соответственно. 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. 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.

3. Скорости выгорания органоугольных топливных композиций в 1.5–2 раза выше, чем угольных. С ростом температуры в камере сгорания и размеров капель топлив скорости выгорания 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 выгорания капель топливных суспензий группы факторов: размеров капель, температуры в камере сгорания, свойств и концентрации основных компонентов. В случае угольных топлив скорости горения не зависят от размеров капель. Также скорости горения ВУТ и ОВУТ слабо меняются при изменении температуры в камере сгорания (выше 600 °С). Выполненное сравнение с известными результатами позволяет сделать для типичных суспензий ВУТ общее заключение в том, что можно обеспечить идентичную скорость горения топлива при впрыске в камеру сгорания суспензии с разными размерами капель. В случае ОВУТ скорости выгорания можно варьировать в широком диапазоне (в частности, от 0.05 мм²/с до 0.3 мм²/с) при изменении размеров капель, температуры в камере сгорания, свойств и концентрации основных компонентов.

4. 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 °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 рост концентрации ТКО уже выше 20% нецелесообразно из-за снижения температуры в области горения ниже 1000 °С. Оптимальный температурный диапазон сжигания КЖТ с добавлением ТКО составил от 1000 °С до 1200 °С. 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 добавленного в композиционное топливо ТКО. Определено, что для исследуемого котла заданной геометрии оптимальным расходом воздуха является 0.25 м³/с, а оптимальным расходом топлива – 0.09 кг/с.

5. В результате выполненного на примере трех регионов Российской Федерации сравнительного анализа установлено, что при полной замене угля эквивалентным по калорийности количеством КЖТ 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 ТКО). В течение этого же интервала времени будет утилизировано около 315 млн тонн фильтр-кеков; около 53 млн тонн ТКО; около 2.5 млн тонн отработанных масел. Предлагаемые мероприятия позволят полностью 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.

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

Основные статьи по теме диссертации

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 углеродного 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.