

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

На правах рукописи

Курганкина Маргарита Александровна

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ
ИЗ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ И УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ
НА ТЭС**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и
агрегаты**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Стрижак П.А.

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ОТХОДОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ НА ТЭС	17
1.1. Проблемы сжигания твердых топлив на ТЭС	17
1.2. Отходы углеобогащения и нефтепереработки – основные компоненты перспективных суспензионных топлив	20
1.3. Перспективные экологические решения для минимизации влияния ТЭС на окружающую среду.....	23
Выводы по первой главе.....	35
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	37
2.1. Исследование основных экологических характеристик сжигания композиционных жидких топлив	37
2.2. Выбор оптимального состава КЖТ	42
2.3. Техничко-экономическое обоснование перехода на перспективные суспензии	45
2.4. Вычисление комплексного параметра эффективности применения КЖТ	53
Выводы по второй главе.....	59
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	60
3.1. Результаты экспериментальных исследований экологических характеристик сжигания композиционных жидких топлив	60
3.2. Критериальное обоснование выбора оптимального состава КЖТ	72
3.3. Результаты технико-экономического обоснования перехода на перспективные суспензии	83

3.4. Относительные показатели для сравнения КЖТ с углем, мазутом и природным газом.....	100
3.5 Перспективы сжигания промышленных отходов, аккумулированных на территориях типичных заброшенных промышленных регионов, в составе КЖТ	140
3.6. Рекомендации по использованию полученных результатов	136
Выводы по третьей главе.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	144
Приложение 1	166
Приложение 2	169
Приложение 3	171
Приложение 4	172
Приложение 5	173

ВВЕДЕНИЕ

Энергетические предприятия несут наибольшую ответственность за ускоряющийся процесс ухудшения экологической обстановки в мире. Несмотря на активное использование газа, нефти и урана, доля угля в мировом производстве электроэнергии высока и составляет около [1–3] 30 % [1–3]. Наблюдается интенсивный рост объемов потребления угля энергетическими предприятиями, что обуславливается возрастанием спроса на недорогую тепловую и электрическую энергию [4]. Например, в Китае к концу 2019 года общая установленная мощность электростанций, работающих на угле, превысила 1000 ГВт. При этом из 3,5 млрд. тонн добываемого угля 50 % использовано для выработки электроэнергии [2,5,6]. Индия занимает пятое место в мире по выработке электроэнергии (345 ГВт). Доля угольных электростанций в энергетическом секторе этой страны составляет 57 % [7–10].

В государствах с развитой угольной теплоэнергетикой (Китай, Индия, Япония, Россия, Австралия и др.) ежегодно регистрируется высокий уровень загрязнения атмосферы. Это обусловлено тем, что в процессе сжигания угля образуется не только энергия, но и опасные вещества [11–13]: антропогенные выбросы (CO_x , NO_x , SO_x); золошлаковые отходы (ЗШО); летучая зола с высоким содержанием тяжелых металлов (As, Cr, Ba, Sr, Zn, Pb, Mo и др.); вода, загрязненная токсичными элементами и радионуклидами.

Мировому научному сообществу хорошо известно влияние, оказываемое на окружающую среду перечисленными отходами [13–15]. В частности, оксиды серы и азота, соединяясь с атмосферной влагой, окисляются, образуя слабые растворы серной и азотистой кислот, которые являются причиной выпадения кислотных дождей [16,17]. Повышение концентрации оксидов азота способствует разрушению озонового слоя атмосферы, который защищает землю от ультрафиолетового космического излучения [13]. Помимо этого оказывают существенное влияние [18] содержащиеся в продуктах сгорания фтор, хлор и их производные, токсичные и канцерогенные микроэлементы, канцерогенные углеводороды. Глобальными факторами воздействия предприятий энергетики на

окружающую среду являются не только выбросы рассмотренных выше оксидов, но и углекислого газа и паров воды, способствующих развитию парникового эффекта и нарушению природно-климатических условий [13,14,19].

Во многих развитых государствах разработке соответствующих технологий для уменьшения концентраций выбросов загрязняющих веществ в атмосферу энергетическими предприятиями и повышения жизненного уровня населения уделяется значительное внимание [20–22]. Зачастую на промышленно развитые страны оказывается давление с требованием снижения выбросов или стабилизации темпов прироста последних. Тем не менее около 45 % мировых выбросов CO_2 образуется преимущественно за счет сжигания угля. При этом лидерами [14] по этому показателю являются США, Китай, Индия, Евросоюз, Россия. В Китае из 100 % выбросов частиц золы 70 % являются результатом деятельности угольных энергетических предприятий [18,23]. Аналогично обстоит дело с выбросами диоксида серы (SO_2) – 90 %, оксидов азота (NO_x) – 67 %, диоксида углерода (CO_2) – 70 % [18,24].

Большие объемы опасных антропогенных выбросов ведут не только к серьезным экологическим последствиям, но также оказывают негативное влияние на здоровье людей [13]. Например, ежегодно в Индии угольными электростанциями выбрасывается в окружающую среду более 110 тыс. тонн твердых частиц золы, 43 млн. тонн SO_2 и 1,2 млн. тонн NO_x [25]. Индия быстрыми темпами обгоняет Китай по выбросам оксидов серы в атмосферу [26]. Угольные электростанции ответственные за 58% из общих выбросов SO_2 . Загрязнение воздуха вследствие работы угольных электростанций вызвало увеличение частоты респираторных заболеваний. Зафиксировано около 75 % случаев преждевременной смерти от сердечно-сосудистых заболеваний у людей в возрасте 30 лет и старше, проживающих вблизи электростанций. В общей сложности случаев преждевременной смерти насчитывается от 80000 до 115000 [7,27].

Из известных [18,20,28] путей минимизации концентраций антропогенных выбросов угольной теплоэнергетики наиболее перспективным считается

применение водоугольных (ВУТ) [29–31] и органоводоугольных (ОВУТ) [32–35] топлив на основе отходов углеобогащения (в частности, фильтр-кеков) и отходов нефтепереработки (отработанных промышленных и бытовых масел, фусов, смол и др.).

Аккумулируемые запасы фильтр-кеков (влажных высокозольных отходов обогащения угля) на сегодняшний день составляют несколько десятков миллионов тонн в год [36]. В последнее время в России, Китае и Индии обсуждаются вопросы вовлечения в энергетику фильтр-кеков каменных углей [30,36]. В фильтр-кеках концентрация угля, как правило, составляет 40–60 %. Поэтому увлажненные фильтр-кеки (в таком виде они получаются и хранятся на обогатительных фабриках) представляют уже готовые к использованию суспензии водоугольного топлива [36].

ВУТ имеет ряд недостатков, так как оно существенно уступает углю по энергетическим показателям (меньше теплота сгорания). К тому же, возникает ряд других проблем, связанных с расслоением (выпадением твердых частиц в осадок – седиментацией) суспензии, что затрудняет транспортировку композиций ВУТ трубопроводным транспортом, их длительное хранение и последующее сжигание [36].

Для предотвращения расслоения суспензии в нее добавляют жидкие горючие пластификаторы и получают так называемые органоводоугольные топлива [36]. В целом такие виды топлив принято называть композиционными жидкими (КЖТ). В качестве жидких горючих компонентов применяются отходы нефтяного происхождения, отложения, образующиеся при очистке нефтепроводов и резервуаров, отработанные масла различных энергоустановок, турбин, двигателей, трансформаторов, объемы которых исчисляются миллионами тонн в год [36,37].

Согласно [37] в мире уже накоплено более 1 млрд. тонн нефтешламов и ежегодно образуется еще 60 млн. тонн. Жидкие нефтепродукты, попадая в водоемы, почву, подземные воды, наносят огромный ущерб окружающей среде [38]. Сжигание типичных жидких горючих отходов в исходном состоянии требует

довольно больших ресурсов, однако в составе КЖТ нефтешламы могут эффективно (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) использоваться для интенсификации зажигания топливного состава, а также для улучшения его реологических характеристик.

Таким образом, применение КЖТ является достаточно перспективным решением нескольких проблем: утилизация перечисленных отходов угле- и нефтепереработки; сокращение темпов добычи угля и разработки новых месторождений; сокращение концентраций антропогенных выбросов в окружающую среду, расширение сырьевой базы для изготовления топлив из отходов и соответствующих остатков.

За последние 50 лет созданы фундаментальные основы технологии промышленного приготовления и сжигания КЖТ в топках энергетических котлоагрегатов. Разработаны физические, математические, прогностические математические модели, экспериментальные методики, методы, алгоритмы численного моделирования, получены зависимости интегральных характеристик от основных параметров процесса, сформулированы теоретические следствия и практические рекомендации. Можно выделить ряд ученых, которые сделали значительный вклад в развитие технологий КЖТ: Wang H., Jianzhong L., Kefa C., Bo Y., Zhang G., Kijo-Kleczkowska A., Sahoo B.K., Meikap B.C., Мурко В.И., Пузырев Е.М., Делягин Г.Н., Осинцев К.В., Ходаков Г.С., Бурдуков А.П., Баранова М.П., Алексеенко С.В., Соломатов В.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Богомоллов А.Р., Кузнецов Г.В., Сыродой С.В. Исследованием КЖТ, имеющих в своем составе помимо угля жидкие горючие компоненты (такие как мазут, керосин, индустриальные масла, водонефтяные эмульсии и др.) занимались Mohapatra S.K., Manwwani P., Kim S.H., Sakai T., Svoboda K., Liu J., Lee C.H., Татарникова Е.В., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Патраков Ю.Ф., Овчинников Ю.В., Лиштван И.И., Богомоллов А.Р., Шевырев С.А., Стрижак П.А., Глушков Д.О., Вершинина К.Ю., Валиуллин Т.Р., Няшина Г.С., Шабардин Д.П.

В мире уже проведены опыты по применению суспензионных топлив в качестве альтернативного топлива взамен угля на энергетических объектах.

Значительный вклад в развитие таких технологий внесли ученые из Китая и Японии [39–42], которые провели совместную работу по приготовлению водоугольного топлива и его дальнейшей транспортировке морскими танкерами до электростанции в Накосо, Япония (энергоблок 600 МВт) [40,41]. В Китае КЖТ широко используется в котлах более 20 теплоэлектростанций, более 300 промышленных печей и сотнях печей для сушки и обжига [42]. Исследования ученых университета штата Пенсильвании (США) подтвердили экологическую эффективность КЖТ (снижение выбросов оксидов серы и азота) [43]. В России успешным считается опыт, заключающийся в транспортировке КЖТ из г. Белово и его сжигании на Новосибирской ТЭЦ-5 [44]. Также проведена опытная эксплуатация котлов при сжигании КЖТ на основе кеков каменных углей на станции Барзас, Кемеровская область [36].

К настоящему времени достаточно хорошо изучены процессы зажигания и горения водоугольных и органоводоугольных суспензий [45–48], вопросы приготовления и сжигания подобных топлив и их реологические характеристики [49–51], а также экологические характеристики [32,52,53]. Результаты научных исследований [32,45–53] дают основание полагать, что КЖТ являются достойной альтернативой углю в качестве основного топлива на ТЭС. К сожалению, позиции энергетиков, экологов и населения по вопросам использования КЖТ вместо угля расходятся вследствие разных интересов (экологических, экономических и энергетических). Как следствие, результаты исследований, перечисленных в работах [32,45–53], достаточно редко доходят до практического использования.

Перспективы дальнейшего развития использования водоугольных и органоводоугольных топлив весьма обширны. Применение КЖТ в энергетическом секторе может служить основой эффективной (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических показателей) замены угля, мазута и природного газа на многих ТЭС с достаточно малыми капитальными затратами и с сохранением на требуемом уровне вредных выбросов в атмосферу. В связи с этим значительный интерес для развития теплоэнергетики представляет проведение комплексного

анализа перспектив применения КЖТ не только с энергетической, экологической и технико-экономической точек зрения.

Целью работы является технико-экономическое обоснование использования композиционных жидких топлив из отходов нефтепереработки и углеобогащения на ТЭС с учетом энергетических и экологических параметров.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка методики технико-экономического обоснования целесообразности сжигания КЖТ из отходов углеобогащения и нефтепереработки на ТЭС, учитывающей экологические, энергетические и экономические характеристики сжигания КЖТ.
2. Разработка методики экспериментальных исследований процессов горения КЖТ с целью определения концентраций основных антропогенных выбросов.
3. Исследование экологических характеристик наиболее перспективных КЖТ с целью анализа необходимых концентраций и свойств компонентов для приготовления топливных суспензий.
4. Установление по результатам экспериментальных исследований экологических характеристик сжигания (концентраций выбросов оксидов азота NO_x и серы SO_x) КЖТ из отходов обогащения типичных марок каменных углей.
5. Проведение технико-экономического обоснования перспективности применения КЖТ на тепловых электрических станциях большой, средней и малой мощностей.
6. Разработка эффективных (по сравнению с пылевидным углем, мазутом и газом) схем приготовления, хранения и использования КЖТ на ТЭС.
7. Разработка рекомендаций по применению КЖТ на ТЭС с разной мощностью, основным и растопочным топливами.

Научная новизна работы. Разработан подход к проведению комплексного технико-экономического обоснования эффективности (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-

экономических характеристик) применения КЖТ на тепловых электрических станциях и котельных взамен традиционных топлив, отличающийся от известных учетом наиболее значимых энергетических, экологических и технико-экономических характеристик используемых топлив. Учтены особенности типичных схем систем топливных хозяйств ТЭС, работающих на угле, мазуте и газе и проведено их преобразование с целью применения КЖТ в качестве основного топлива. Разработанная схема системы топливного хозяйства является универсальной с точки зрения возможности использования КЖТ разного состава на ТЭС. Определены относительные показатели эффективности (с точки зрения основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) КЖТ с учетом группы значимых параметров (теплота сгорания и расход топлива; антропогенные выбросы и зольный остаток; максимальная температура горения; минимальные температуры зажигания; времена задержки инициирования горения; стоимость компонентов; технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания топлива; пожаровзрывобезопасность).

Практическая значимость. Выполненные исследования позволили получить экспериментальную информационную базу данных для сравнительного анализа основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик сжигания перспективных КЖТ вместо углей, мазута и газа. Получены результаты прогностического расчета перевода трех типичных объектов теплоэнергетики (с различными тепловой и электрической мощностями, видом и объемом используемого топлива) с традиционного топлива на нескольких перспективных (с точки зрения энергетики, экономики и экологии) суспензий. Установлены экономические затраты, связанные с переходом на КЖТ, и возможные последствия. При этом в зависимости от приоритетов и требований по антропогенным выбросам, стоимости топлива и энергетическим характеристикам можно варьировать концентрацию и тип компонентов КЖТ. База веществ и материалов для приготовления композиционных жидких топлив очень широкая: фильтр-кеки, шламы, фусы, смолы, отработанные масла и др.

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.

Степень достоверности результатов экспериментальных и теоретических исследований подтверждается выполненными оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием современных высокоточных оптических методов и программно-аппаратных комплексов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования горения частиц композиционных жидких топлив выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15–19–10003), а также Гранта Президента РФ (проект № МД-314.2019.8) и проекта ВИУ-ИШФВП-60/2019 в рамках программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета. 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 энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»), так как применение КЖТ вместо угля позволяет существенно снизить антропогенные выбросы, эффективно утилизировать многочисленные индустриальные отходы, повысить технико-экономические характеристики сжигания низкосортных угольных топлив.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Новый подход к технико-экономическому обоснованию использования КЖТ на ТЭС в качестве основного и/или дополнительного топлива, отличающийся

от известных учетом основных экологических, энергетических и экономических характеристик и базирующийся на частичной модернизации систем топливоприготовления и топливоподачи на станции.

2. Проведенные оценки основных вложений показали, что модернизация котлов ТЭС, работающих на угле, мазуте и газе, при переходе к сжиганию КЖТ из отходов углеобогащения и нефтепереработки может окупиться в течение 1–3 лет. Сравнение результатов исследований для котлов с разной производительностью показали, что чем больше расход топлива в энергетических установках и объемы вырабатываемой энергии, тем меньше срок окупаемости перехода на КЖТ.
3. Относительные показатели эффективности КЖТ в качестве основного топлива ТЭС с учетом группы энергетических, экологических и экономических показателей (теплота сгорания и расход топлива; антропогенные выбросы и зольный остаток; максимальная температура горения; минимальные температуры зажигания; времена задержки инициирования горения; стоимость компонентов; технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания топлива; пожаровзрывобезопасность) в 2-10 раз выше по сравнению с углем и мазутом.
4. Максимальную относительную эффективность (с точки зрения наиболее важных для ТЭС экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) технологий КЖТ на ТЭС можно получить при масштабном вовлечении отходов углеобогащения (шламов, кеков, промпродукта) в качестве основных твердых горючих компонентов.

Личный вклад автора состоит в формулировке задач диссертационных исследований, планировании экспериментов, разработке методик, проведении опытов и технико-экономического обоснования, обработке результатов экспериментальных и теоретических исследований, апробации последних, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении экспериментальных данных, разработке рекомендаций использования результатов исследований, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Всероссийских научных конференциях с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2016, 2017), Международных научных конференциях «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2016, 2017, 2019), Международном научном симпозиуме «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016, 2017, 2018), Международных форумах «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2016, 2017), XXXIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2017), II Международной конференции «Рациональное природопользование: традиции и инновации» (Москва, 2017), X Всероссийской научной молодежной конференции «Арктика и ее освоение» (Томск, 2017), IX Международном семинаре по структуре пламен (Новосибирск, 2017), Международной научной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017), VII Международном семинаре «Проблемные вопросы тепломассообмена при фазовых превращениях и многофазных течениях в современных аппаратах химической технологии и энергетическом оборудовании» (Новосибирск, 2018), «XXXIV Сибирском теплофизическом семинаре» (Новосибирск, 2018), Седьмой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018), Российско-Казахстанском симпозиуме «Углекислотная химия и экология Кузбасса» (Кемерово, 2018), «XXXVI Сибирском теплофизическом семинаре» (Новосибирск, 2020), XVI Всероссийской школе-конференции молодых учёных с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020).

Публикации. Основные положения, результаты и выводы диссертационных исследований опубликованы в 19 статьях, в том числе 6 – в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Известия вузов. Проблемы энергетики», «Безопасность жизнедеятельности», «Химическое и нефтегазовое машиностроение», «Известия Томского политехнического университета.

Инжиниринг георесурсов», «Кокс и химия». Опубликовано 13 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Journal of Hazardous Materials» (ИФ=9.04, Q1), «Energy Conversion and Management» (ИФ=8.21, Q1), «Environmental Pollution» (ИФ=6.79, Q1), «Journal of Cleaner Production» (ИФ=7.25, Q), «Science of the Total Environment» (ИФ=6.55, Q1), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=4.73, Q1), «Waste and Biomass Valorization» (ИФ=2.85, Q2), «EPJ Web of Conferences», «AIP Conference Proceedings», «MATEC Web of Conferences».

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 181 наименование, содержит 26 рисунков, 40 таблиц, 175 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, научная новизна полученных результатов и личный вклад автора диссертации.

В первой главе проанализировано современное состояние проблемы сжигания твердых, жидких и суспензионных топлив на тепловых электрических станциях. Определены перспективные экологические решения для минимизации влияния ТЭС на окружающую среду. Особое внимание уделено угольным ТЭС. Определены основные достижения в области исследований КЖТ, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий КЖТ (особенно при внедрении подобного топлива в производство тепловой и электрической энергии на ТЭС).

Во второй главе приведено описание использованного в диссертационном исследовании стенда и разработанных методик регистрации концентраций выбросов NO_x и SO_x при сжигании угля и КЖТ на базе отходов углеобогащения (фильтр-кеков пяти распространенных как в России, так и за рубежом марок «Г», «Д», «К», «СС», «Т») и горючих жидкостей (мазута, отработанного турбинного масла). На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие снижение выбросов NO_x и SO_x при сжигании КЖТ по сравнению с углем. Также приведено описание разработанных методик

проведения технико-экономического обоснования (ТЭО) эффективности применения КЖТ взамен традиционного топлива на типичных объектах энергетики (котельной и двух ТЭС), работающих на разных видах топлива (твердом, жидком, газовом), с учетом экологических, энергетических и экономических характеристик изучаемых топлив. Выполнено преобразование типичных схем систем топливных хозяйств котельной и ТЭС, работающих на твердом (уголь), жидком (мазут) и газовом (природный газ) топливах для использования КЖТ.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований, послужившие основанием для формулирования второго, третьего и четвертого защищаемых положений. В частности, для развития второго защищаемого положения диссертации введен в рассмотрение относительный показатель эффективности (с точки зрения наиболее важных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) использования КЖТ в качестве основного на ТЭС с учетом группы значимых параметров (теплота сгорания, расход топлива, антропогенные выбросы, зольный остаток, максимальная температура горения, минимальные температуры зажигания, времена задержки инициирования горения, экономические затраты, пожаровзрывобезопасность):

$$I_{\text{отн}} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] + [\gamma_2 \cdot G_{\text{отн}}] + [\gamma_3 \cdot A_{\text{NOx отн}} \cdot A_{\text{SOx отн}}] + [\gamma_4 \cdot M_{\text{отн}}] + [\gamma_5 \cdot S_{\text{отн}}] + [\gamma_6 \cdot P_{\text{отн}}] + [\gamma_7 \cdot N_{\text{отн}}],$$

где γ_i – весовые коэффициенты (в первом приближении можно роль всех перечисленных факторов считать равнозначной, тогда $\gamma_i = 1$, $i = 1 \dots n$, где n – количество учитываемых факторов).

Для развития третьего защищаемого положения диссертации рассчитаны затраты на технологические изменения на ТЭС и котельных при переходе на КЖТ. Показано, что они окупаются в течение 1–3 лет. В качестве типичных объектов энергетики выбраны небольшая котельная и две тепловые электрические станции.

Для развития четвертого защищаемого положения диссертации спрогнозирована относительная эффективность (с точки зрения наиболее важных

для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) технологий КЖТ на ТЭС при широкомасштабном вовлечении отходов углеобогащения (шламов, кеков, промпродукта) в качестве основных угольных компонентов топлив. На примере сжигания одиночной капли КЖТ определены основные приоритеты для обеспечения перспективности компонентов и суспензий в целом: стоимость, время задержки зажигания, минимальная достаточная температура окислителя, длительность процесса горения, теплота сгорания КЖТ. Методика выбора оптимального (с точки зрения энергетических и экономических показателей) состава КЖТ основывалась на четырех принципах: минимизация стоимости суспензионной композиции; максимизация теплоты сгорания; максимизация длительности процесса горения; минимизация времени задержки зажигания (инерционности начальной стадии горения).

В заключении подведены основные итоги диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ОТХОДОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ НА ТЭС

1.1. Проблемы сжигания твердых топлив на ТЭС

Угольные тепловые электрические станции (ТЭС) и котельные установки занимают устойчивые позиции в структуре мирового производства энергии (рисунке 1.1.1). Ежегодно строятся новые станции и котельные, работающие на угле, несмотря на большие негативные экологические последствия. Например, за последние десятилетия выбросы в атмосферу CO_2 увеличились в несколько раз [14]. На протяжении многих лет лидерами по этому показателю являются США, Китай, Индия, Евросоюз, Россия [14]. Более половины выбросов CO_2 в атмосферу приходится на энергетические предприятия [14].



Рисунок 1.1.1. Установленные мощности (МВт) угольных тепловых электростанций по всему миру [54–57]

Согласно данным международного энергетического агентства в 2018 году зафиксирован рост потребления угля на 1.4%, что вдвое превысило средний показатель за 10 лет [2]. По прогнозам доля выработки электроэнергии на угольных электростанциях в 2040 году упадет в 1,5 раза к 2018 году – до 25%,

однако ее абсолютный объем увеличится на 3% [58]. При этом лидирующие позиции занимают Китай, США, Индия, Япония, Россия и Южная Африка (таблица 1.1.1).

Таблица 1.1.1. Объемы потребления угля [2]

Млн. тонн	Объемы потребления									Средний темп роста в год, %	
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018		
										2007-2017	2018
Китай	1748.9	1903,9	1927.8	1969.1	1954.5	1914.0	1889.1	1890.4	1906.7	1.8	0.9
США	498.8	470.6	416.0	431.8	430.9	372.2	340.6	331.3	317.0	-4.9	-4.3
Индия	290.4	304.6	330.0	352.8	387.5	395.3	400.4	415.9	452.2	5.7	8.7
Япония	115.7	109.6	115.8	121.2	119,1	119,9	119.9	119.9	117.5	0.2	-2.1
Россия	90.5	94.0	98.4	90.5	87.6	92.1	89.3	83.9	88.0	-1.1	4.9
Южная Африка	92.8	90.5	88.3	88.4	89.5	85.2	86.9	84.3	86.0	0.1	2.0
Весь мир	3610.1	3782.5	3797.2	3867.0	3864.2	3769.0	3710.0	3718.4	3772.1	0.7	1.4

Среди существующих проблем сжигания твердых топлив на ТЭС можно выделить несколько. Во-первых, ухудшение экологической обстановки. Так как сжигание угля сопровождается высокими концентрациями антропогенных выбросов: оксидов серы (SO_x), азота (NO_x) и углерода (CO_x), твердых частиц, летучих органических соединений и тяжелых металлов [7,13,59]. В свою очередь большие объемы опасных антропогенных выбросов ведут не только к серьезным экологическим последствиям (выпадение кислотных дождей, разрушение озонового слоя атмосферы Земли, ухудшение качества почв и природных вод и пр.), но также оказывают негативное влияние на здоровье людей (увеличивается количество острых и хронических респираторных заболеваний). Кроме того, в результате обогащения угля образуются многочисленные (миллионы тонн) отходы, скорость утилизации которых много меньше скорости их образования. Большая часть отходов углеобогащения складывается на специально отведенных территориях (отвалах). Это, в свою очередь, также негативно влияет на окружающую среду. Так как продолжительное хранение значительных объемов подобных отходов, характеризующихся повышенным содержанием вредных и опасных элементов, приводит к загрязнению атмосферы и почв. Таким образом,

возрастает суммарная техногенная нагрузка предприятий угольной энергетики на окружающую среду.

Во-вторых, запасы угля во всем мире ограничены. Исходя из сегодняшних объемов мирового потребления (с учетом настоящих запасов в пределах колеблющихся величин запасов) углей хватит приблизительно на 180 лет. Следует учесть, что со временем также растет и потребность в электроэнергии.

В-третьих, с конца 60-х годов произошло ужесточение требований к загрязнению среды газообразными и твердыми выбросами в виде золы и шлаков тепловыми электрическими станциями. Таким образом, увеличение расходов на решение этих экологических проблем (на системы газоочистки и золоудаления современных тепловых электростанций теперь приходится около 40 % капитальных затрат и 35 % эксплуатационных расходов) наряду с возросшей стоимостью строительства таких сложных объектов, как ТЭС, привело к снижению благоприятных перспектив их развития с экономической точки зрения. Кроме того, на сегодняшний день многие тепловые электростанции достигли предела модернизации, который определяется износом материалов котлов и турбин.

Следует отметить, что с 2014 [2] наблюдается замедление роста потребления угля (табл. 1.1.1). В первую очередь данный факт обусловлен тем, что ряд стран, таких Китай и США, дошли до определенного предела в развитии угольной энергетики и осознали опасность, которую несет сжигание угля на тепловых электрических станциях (ТЭС) для здоровья и жизни людей, а также окружающей среды в целом.

В США рекордными темпами закрываются электростанции, работающие на угле, и в ближайшее время эта тенденция не изменится [60]. Доля электроэнергии, получаемой при сжигании угля, в этой стране снизилась с 51 % в 2008 году до 28 % в 2018 [2,60].

Правительство Китая ведет активную политику, направленную на снижение выбросов путем сокращения доли угля в энергопотреблении [61–63]. Объяснением этому является критическое состояние атмосферного воздуха.

Согласно исследованиям Institute for health metrics and evaluation глобального бремени болезней (GBD) в этой стране длительное воздействие загрязнения наружного и внутреннего воздуха привело к 6,1 миллионaм случаев преждевременной смерти от инсульта, сердечного приступа, рака легких и хронических заболеваний легких [64].

Вопросам снижения концентраций выбросов загрязняющих веществ в атмосферу энергетическими предприятиями и повышения жизненного уровня населения уделяется значительное внимание также и в других странах мира, таких как Индия, Япония, Россия [45,63,65]. Основная цель предпринимаемых усилий заключается в разработке и внедрении новых эффективных экологических топливных технологий.

1.2. Отходы углеобогащения и нефтепереработки – основные компоненты перспективных суспензионных топлив

Значительная доля добываемого угля обогащается при подготовке для экспорта. В процессе обогащения каменных углей при сгущении угольной шламовой суспензии с применением поверхностно-активных веществ (флокулянтов) [30,62,66] образуются отходы, которые условно делятся на три вида: промпродукт, шлам, фильтр-кек. Накопленные объемы таких отходов переработки угля составляют несколько десятков миллионов тонн в год (таблица 1.2.1).

Таблица 1.2.1. Мировые объемы отходов переработки угля с 2007 по 2019 гг. (использованы данные [2]).

Год	Потребление угля, Мт							Отходы углеобогащения, Мт *
	Китай	Индия	США	Россия	Южная Африка	Австралия	Турция	
2007	2821	542	1021	210	187	141	99	602,52
2008	2920	581	1018	227	202	140	99	622,44
2009	3158	652	904	203	187	144	100	641,76
2010	3350	684	954	212	193	133	95	674,52
2011	3695	715	910	221	182	128	101	714,24
2012	3832	777	807	232	189	127	99	727,56

Продолжение таблицы 1.2.1

Год	Потребление угля, Мт							Отходы углеобогащения, Мт *
	Китай	Индия	США	Россия	Южная Африка	Австралия	Турция	
2013	3969	810	837	207	192	116	84	745,8
2014	3837	899	831	199	199	111	97	740,76
2015	3770	889	722	222	185	116	93	719,64
2016	3718	905	663	215	188	117	107	709,56
2017	3732	937	650	225	182	116	112	714,48
2018	3770	982	624	234	186	113	125	724,08
2019	3860	985	530	234	189	119	111	726,01

** данные пересчитаны в соответствии со средними значениями объемов добычи угля; принято допущение о том, что формируемые отходы не утилизируются, а складываются*

В последнее время в России, Китае и Индии обсуждаются вопросы вовлечения в энергетику фильтр-кеков каменных углей [36], аккумулируемые запасы которых на сегодняшний день составляют несколько десятков миллионов тонн в год [36]. Фильтр-кек представляет смесь мелкодисперсного угля (размер частиц до 100 мкм) и воды и образуется при флотации каменного угля. В соответствии с этим методом обогащения реализуется промывание угольной породы водой с применением поверхностно-активных веществ, а также дальнейшая классификация углей на грохотах с целью разделения по фракциям. Вода, использованная для промывки породы, подается для осветления в специальные емкости, в которых происходит осаждение частиц угля. Суспензия откачивается и направляется в ленточные пресс-фильтры, в которых происходит ее фильтрация через специальную мембрану (фильтровальную ткань) – реализуется отжим. Образующийся в результате этого процесса влажный остаток угольных частиц является фильтр-кеком. В фильтр-кеках, как и в ВУТ, концентрация угля, как правило, составляет 40–60 %, поэтому увлажненные фильтр-кеки (в таком виде они получаются и хранятся на обогатительных фабриках) представляют уже готовые к использованию водоугольные топлива (ВУТ) [36].

Применение ВУТ в качестве основного топлива (например, вместо угля или мазута) энергетических предприятий позволяет достигнуть нескольких целей: снизить антропогенные выбросы в окружающую среду, утилизировать отходы углеобогащения, освободить большие территории соответствующих отвалов, снизить темпы добычи угля и разработки новых месторождений. Однако водоугольное топливо позволяет решить перечисленные проблемы не полностью, так как оно существенно уступает углю и мазуту по энергетическим показателям (меньше теплота сгорания). К тому же, возникает ряд других проблем, связанных с расслоением (выпадением твердых частиц в осадок – седиментацией) суспензии, что затрудняет транспортировку ВУТ трубопроводным транспортом, их длительное хранение и последующее сжигание [36]. Для предотвращения расслоения суспензии в нее добавляют жидкие горючие пластификаторы и получают так называемые органоводоугольные топлива (ОВУТ) [36]. В целом такой вид топлив принято называть композиционными жидкими (КЖТ).

В качестве жидких горючих пластификаторов применяют отходы нефтяного происхождения, отложения, образующиеся при очистке нефтепроводов и резервуаров, отработанные масла различных энергоустановок, турбин, двигателей, трансформаторов, объемы которых исчисляются миллионами тонн в год [36,37] и требуют утилизации. Согласно [37] в мире уже накоплено более 1 млрд. тонн нефтешламов и ежегодно образуется еще 60 млн. тонн. Жидкие нефтепродукты, попадая в водоемы, почву, подземные воды, наносят огромный ущерб окружающей среде [38]. Достаточно перспективным решением данной проблемы является создание топливных КЖТ [36]. Сжигание типичных жидких горючих отходов в исходном состоянии требует довольно больших ресурсов, однако в составе КЖТ нефтешламы могут эффективно (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) использоваться для интенсификации зажигания топливного состава, а также для улучшения его реологических характеристик.

1.3. Перспективные экологические решения для минимизации влияния ТЭС на окружающую среду

В настоящее время во многих странах мира (в частности, Китае, Индии, США, Великобритании, России, Германии, Сингапуре) особое внимание уделяется разработке и внедрению «экологически чистых» угольных технологий [18,67,68], среди которых можно выделить: 1) технологию улавливания и хранения углерода (Carbon Capture and Storage (CCS)); 2) технологию улавливания и использования углерода (Carbon Capture and Utilisation (CCU)). Первая из этих технологий предполагает улавливание CO_2 на крупных источниках (электростанции, сталелитейные, цементные, нефте- и газоперерабатывающие заводы и фабрики), его транспортировку и дальнейшее хранение в геологических формациях (истощенные нефтяные и газовые месторождения, минерализованные водоносные пласты и т. д.). Отличие второй технологии заключается в том, что улавливаемый углекислый газ служит в качестве коммерческого продукта для пищевой и химической промышленности. Применение данных технологий весьма эффективно (скорость захвата выбросов CO_2 составляет 87–100 %) [67]. С точки зрения экономической выгоды, они уступают другим методам в связи с высокими затратами энергии, необходимой на добычу, транспортировку и подготовку минералов для удержания CO_2 .

Ряд других работ [69–73], посвященных кислородному сжиганию пылевидного угля, подтверждают перспективность использования данной технологии для сокращения выбросов парниковых газов (в частности, CO_2) в атмосферу. Сравнительный анализ показывает, что применение кислородного сжигания угольной пыли позволяет не только переработать образующийся CO_2 , но также снизить выбросы оксидов азота (NO_x). Так, например, в [69] приведены результаты моделирования сжигания пылевидного угля в кислороде. Изменялось соотношение размеров частиц угольной пыли (сверхтонких – 20 мкм и обычных – 70 мкм). Результаты показали, что смешивание пылевидных углей с частицами разных размеров может повысить не только производительность горения, но

также сократить выбросы NO_x . Наиболее значимо данный эффект проявляется при увеличении отношения количества сверхтонкого угля к углю обычного размера с 30 % до 50 % [69].

Еще одним перспективным методом снижения выбросов CO_2 и минимизации проблем, связанных с глобальным потеплением, является совместное сжигание угля и биомассы в качестве топлива [74–77]. Биомасса составляет 10–14 % от общего мирового объема топлива и является четвертым по величине глобальным энергетическим ресурсом [74]. Однако применение данной технологии связано с рядом недостатков, например, дорогостоящим дооснащением системы впрыска топлива и неустойчивым процессом горения.

В [78] предложено использование в качестве топлива угля, пропитанного глицерином. Основной акцент в [78] сделан на изучении характеристик полученного топлива и выбросов при его сжигании с использованием экспериментальных и численных методов. Результаты [78] показали, что пропитка глицерином способствовала увеличению теплотворной способности угля, улучшению горючести при низких и высоких температурах, а также снижению выбросов оксидов азота (NO_x).

На сегодняшний день в России [79–81] и многих других странах [32,82–85] актуальным является использование композиционных жидких топлив. Основной акцент при создании КЖТ сделан [86] на использование низкосортных углей, органических отходов и тяжелых нефтяных остатков. Преимущества применения данных видов топлив заключаются в следующем. Во-первых, замена угля композиционным жидким топливом позволяет минимизировать (практически свести к нулю) выбросы оксидов серы и азота при его сжигании в работе энергетических установок. Во-вторых, данный подход обеспечивает расширение сырьевой базы для изготовления топлив из отходов и соответствующих остатков, а также повышение полноты сгорания низкосортных углей. В-третьих, использование отходов углепереработки (в частности, фильтр-кеков) и тяжелых нефтяных остатков в качестве компонентов при создании КЖТ способствует их эффективной утилизации. Особенно значимым это преимущество становится,

если принять во внимание, что уже имеющиеся (аккумулируемые) запасы фильтреков из отвалов достигают нескольких десятков миллионов тонн. Применение подобных продуктов углепереработки устранил необходимость многих стран в добыче угля (и разработке новых месторождений) на длительный период времени.

К настоящему времени хорошо изучены процессы зажигания и горения водоугольных и органоводоугольных суспензий, вопросы приготовления подобных топлив и их реологические характеристики, а также экономические и экологические характеристики. Результаты научных исследований (в табл. 1.3.1 приведен краткий обзор основных публикаций в лидирующих международных журналах) дают основание полагать, что КЖТ являются достойной альтернативой углю в качестве основного топлива на ТЭС и котельных.

Таблица 1.3.1. Обзор основных направлений реализуемых в мире исследований в области КЖТ

Источник	Основные достижения
	Зажигание и горение
[87]	Проведены масштабные эксперименты по сжиганию в режиме нанокластерного инициирования пульсационного горения ВУТ и других некондиционных топлив. Получена обширная информация об особенностях протекающих физико-химических процессов такого горения в присутствии перегретого водяного пара.
[88]	Предложено решение задачи зажигания частицы ВУТ в условиях радиационно-конвективного теплообмена с внешней средой. Проведено математическое моделирование. Установлено влияние конфигурации частицы на времена задержки воспламенения на примере двух достаточно типичных форм (сфера и куб).
[36,89–91]	Определены интегральные характеристики зажигания и горения ОВУТ (минимальные температуры зажигания, максимальные температуры горения, времена задержки зажигания, времена горения).
[92]	Проведено комплексное исследование процессов горения капель ВУТ в потоке разогретого воздуха и в псевдоожигенном слое. Проведен комплексный анализ морфологии капель топлива и динамики их горения.
[93]	Проведено моделирование процессов испарения капель жидкого

Продолжение таблицы 1.3.1

Источник	Основные достижения
	Зажигание и горение
	топлива, подающегося в камеру сгорания с псевдоожиженным слоем.
[94]	Проведен анализ механизмов взаимодействия распыленного потока ВУТ с псевдоожиженным слоем в камере сгорания. Установлены скорости образования углеродных фаз при горении ВУТ.
[63]	Проведены экспериментальные исследования характеристик горения водоугольного топлива совместно с нефтяными шламами в камере сгорания с псевдоожиженным слоем.
[95]	Проведен анализ влияния условий (температура и высота псевдоожиженного слоя, скорость газов и пр.) эксплуатации на характеристики горения ВУТ в камере сгорания с псевдоожиженным слоем. Проведено моделирование сжигания капель ВУТ в псевдоожиженном слое.
[32]	Проведен анализ характеристик горения ВУТ (скорость воспламенения, температура пламени, эффективность сгорания, концентрации выбросов загрязняющих веществ) с добавлением промышленных жидких отходов.
[96]	Представлены результаты распыления ВУТ пневмомеханическими форсунками с последующим сжиганием топлива в вихревой печи. Установлены оптимальные размеры капель топлива для их эффективного выгорания.
[97]	Представлена новая оценка сжигания ВУТ в вертикальной циклонной топке с жидким шлакоудалением. Проведен анализ влияния соотношения компонентов воздух/топливо, схемы распределения воздуха, тепловой нагрузки топки котла на динамику горения топлива.
[98]	Приведены результаты исследования основных закономерностей и характеристик процессов низкотемпературного инициирования горения одиночных капель органоводоугольных топливных композиций в потоке окислителя. Установлены значения времен задержки зажигания и полного сгорания одиночных капель органоводоугольных топлив различных составов при варьировании температуры и скорости потока окислителя в широком диапазоне, вида и концентраций используемых компонентов.
[99]	Изложены результаты исследования основных характеристик инициирования горения частиц композиционного жидкого топлива при витании в потоке разогретого воздуха в модельной камере сгорания. Определены необходимые и достаточные условия для реализации витания и зажигания частиц КЖТ,

Продолжение таблицы 1.3.1

Источник	Основные достижения
	Зажигание и горение
	приготовленных на основе перспективных компонентов из числа отходов угле– и нефтепереработки. Установлены два устойчивых режима витания и зажигания в камере сгорания.
	Приготовление суспензий, стабильность, реологические характеристики, распыление
[100]	Рассмотрены вопросы высокоэнергетического воздействия на уголь в процессе приготовления пылеугольного топлива и ВУТ, в частности его помола на шаровой барабанной мельнице, и последующего доизмельчения с помощью дезинтегратора или проведения кавитационной обработки водоугольной суспензии. Оба метода позволяют повысить дисперсность угля. Дано физическое объяснение полученных результатов.
[101]	Получена гомогенная топливная суспензии (на основе угля) с высокой концентрацией твердого вещества (65–70 масс. %) и низкой вязкостью (порядка 1 Па·с) с применением различных смачивающих агентов и диспергаторов.
[102]	Проведен анализ влияния поликарбоксилатных диспергаторов на реологические свойства ВУТ.
[103]	Разработаны методы исследования динамики горения и газификации отдельных капель ВУТ. С применением лазерного нагрева установлены: термометрическая, пирометрическая и концентрационная динамика однокапельного сжигания, полное время горения, длительность температурных фаз горения, температура воспламенения, скорости газификации продуктов сгорания.
[92]	Проведён комплексный анализ морфологии капель ВУТ.
[104]	Проведен анализ влияния концентрации угля, кислотности суспензии (pH of mixture), различных добавок и электролитов, пластификаторов и температуры на вязкость и реологические характеристики ВУТ.
[105]	Проведено исследование реологических характеристик водоугольного топлива на основе углей различной зольности с применением новой технологии микроволновой обработки.
[106]	Проведен анализ влияния распределения размеров угольных частиц на реологические характеристики ВУТ на основе углей различной степени метаморфизма.
[107]	Проведен анализ влияния ряда параметров (степень карбонизации угля, химический состав (влаги, зольность, летучие, кислород, углерод и пр.), поверхностная химия (смачиваемость, адсорбция и пр.), распределение частиц по размерам и пр.) на свойства ВУТ.
[108]	Проведен анализ влияния химических диспергаторов и

Продолжение таблицы 1.3.1

Источник	Основные достижения
	Приготовление суспензий, стабильность, реологические характеристики, распыление
	стабилизаторов на реологические свойства CWS (вязкость, стабильность и пр.).
[109]	Проведен синтез нового высокоэффективного диспергатора для ВУТ на основе щелочного лигнина пшеничной соломы.
[110]	Проведен анализ влияния ряда параметров (вид и концентрация добавок, распределение угольных частиц по размерам, концентрация твердых компонентов) на реологические свойства ВУТ. В качестве компонентов ВУТ использовались новые разработанные анионоактивные добавки.
[111]	Установлено влияние неионного диспергатора (полиоксиэтилен сорбитанмоноолеат) на угольные частицы в составе ВУТ.
[42]	Проведен анализ влияния пористости фрактальной структуры сверхтонкого КЖТ на его реологические характеристики (вязкость, скорость сдвига) и динамику горения (температура воспламенения, энергия активации).
[112]	Проведен анализ деформации и распада капель ВУТ. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с результатами моделирования.
[113]	Проведен анализ влияния органических растворителей на реологические и термические свойства водоугольных суспензий.
[114]	Представлены результаты численного моделирования вторичного разрушения капель органоводоугольных композиций. Установлены режимы разрушения капель в зависимости от числа Вебера, варьирующегося от 7 до 212.
	Экологические характеристики сжигания
[115,116]	Установлены характерные концентрации выбросов NO_x и SO_x при сжигании каменных углей, отходов углепереработки (фильтр-кеков), ВУТ и ОВУТ на их основе.
[117]	Установлены характеристики высокотемпературного потока дымовых газов, образующихся при сжигании ВУТ в вертикальной циклонной топке с жидким шлакоудалением применением двумерного метода цифровой трассерной визуализации.
[32]	Установлены характерные концентрации SO_2 и NO_x при сжигании ВУТ с добавлением промышленных жидких отходов.
[63]	Установлены характерные концентрации выбросов SO_2 , NO_x , зольного остатка и летучей золы, образующихся при совместном горении ВУТ и нефтяных шламов в камере сгорания с псевдоожиженным слоем.
[118]	Проведен анализ проблемы использования водоугольного

Продолжение таблицы 1.3.1

Источник	Основные достижения
	Экологические характеристики сжигания
	топлива в энергетике, определены перспективные области его применения.
[119]	Рассмотрены вопросы организации сжигания водоугольных суспензий различных типов на пылеугольных котлах тепловых электрических станций. Приведены рекомендации по улучшению экономических и экологических показателей, а также повышению надежности топочных устройств и котла в целом.
[120]	Проведен анализ процессов сжигания осадков сточных вод совместно с углем и древесиной в камере сгорания с циркулирующим кипящим слоем. Установлено снижение выбросов оксидов азота и серы.
[121]	Проведен анализ процессов сжигания пшеничной соломы совместно с углем в топке с псевдоожиженным слоем. Сжигание данного топлива привело к снижению концентраций NO_x и SO_2 в выбросах.
[97]	Установлены характерные концентрации выбросов NO_x при изменении соотношения воздух/топливо.
[122]	Выполнены экспериментальные исследования экологических характеристик горения суспензионных топлив из отходов углепереработки с добавками биомассы. Установлены теоретические зависимости концентраций газовых антропогенных выбросов от температуры в камере сгорания, способа приготовления, концентрации и типа основных горючих и негорючих компонентов, концентрации и типа добавок растительного происхождения.
	Технологии приготовления и сжигания КЖТ
[123]	Патент на изобретение, относящееся к энергетике и предназначенное для распыливания жидкостей и ВУТ.
[124]	Патент на изобретение, относящееся к устройствам для сжигания жидкого топлива, в том числе водоугольного в различных котельных установках промышленной теплоэнергетики и других теплогенерирующих системах.
[125]	Патент на полезную модель, относящуюся к способам приготовления ВУТ для его последующего сжигания. Техническим результатом предлагаемой полезной модели является создание простой технологической линии для приготовления ВУТ и его сжигания, позволяющей минимизировать энергозатраты на приготовление ВУТ, с низкой себестоимостью и широкой сферой применения, и проводить его сжигание с минимальными выбросами вредных веществ.
[80]	Рассмотрены примеры опытно-промышленной реализации

Продолжение таблицы 1.3.1

Источник	Основные достижения
	Технологии приготовления и сжигания КЖТ
	технологий факельно-капельного сжигания водоугольной смеси в топках над слоем горящего угля и в вихревой топочной камере.
[126]	Выполнены исследования по технологии приготовления водоугольного топлива и его сжигания. Разработано новое оборудование для этих целей. Приведены примеры опытно-промышленного использования технологии ВУТ.
[127]	Проведено обоснование технических и технологических решений реконструкции паровых котлов малой мощности с переводом их на сжигание ВУТ. Осуществлен выбор методики расчетов и проектирования камеры горения, камеры охлаждения и других поверхностей нагрева котла. Составлен тепловой баланс реконструированного котла, работающего на ВУТ. Проведена технико-экономическая оценка такой реконструкции и проанализировано изменение экологических характеристик.
[128]	Разработана и предложена новая схема вихревого сжигания ВУТ в энергетических котлах. Схема обоснована проведением подробного математического моделирования топочных процессов на примере газомазутного котла П-56ГМ и котла БКЗ-75-39ФБ.
[129]	Представлено обоснование применения низкотемпературного вихревого способа сжигания для перевода котлов на использование водоугольного топлива (ВУТ). Разработана технология его сжигания в вихревой топке мазутного котла ДКВР 6,5/13.
[130]	Приведены результаты анализа данных по использованию различных технологий производства и сжигания водоугольного топлива.

Также предпринимались попытки проведения технико-экономических расчетов, основанных на реальных проектах модернизации функционирующих энергетических объектов. Следует выделить исследователей Овчинникова Ю.В., Бойко Е.Е., Луценко С.В. В частности, известен эффективный инновационный проект по переводу газомазутной котельной (г. Павлодар, республика Казахстан) на сжигание искусственных композиционных жидких топлив (ИКЖТ). В ходе расчетов выбран состав ИКЖТ, разработаны проектные решения по переоборудованию котельной с учетом существующего и дополнительного оборудования. Предложены способы производства и сжигания топлива,

технологическая линия приготовления ИКЖТ. Проведен расчет стоимости оборудования, входящего в технологическую линию по производству и сжиганию топлива. Выполнена оценка стоимости всей работы в целом и проведен расчет эффективности данного инновационного проекта, в результате которого сделан вывод о его высокой коммерческой привлекательности: срок окупаемости составил 1,82 года, индекс дохода 3,26. Исследователями выполнен расчет инновационного проекта завода по производству ИКЖТ, который также оказался весьма привлекательным для потенциальных инвесторов (срок окупаемости составил 2,6 года, индекс дохода 2,4). Таким образом, использование ИКЖТ в качестве топлива в теплоэнергетических установках технологически осуществимо и не требует значительных изменений в схеме производства. Согласно расчетам капиталовложения в модернизацию теплоэнергетических установок при переводе их на ИКЖТ окупаются за 2–3 года, а индекс доходности от осуществления подобных проектов равен 2–3. Также Овчинниковым Ю.В., Бойко Е.Е., Луценко С.В. сделано заключение о том, что внедрение ИКЖТ в практику целесообразно начинать с объектов малой энергетики по причине меньших капиталовложений и высокой оборачиваемости капитала.

Технологии использования КЖТ взамен нефтепродуктов получили активное распространение в начале 70-х годов XX века в Китае, Японии, Швеции, США и других странах во время мирового «нефтяного кризиса» [46]. В настоящее время наиболее активно данные технологии развиваются в Китае и Японии. Так, в большинстве крупных городов Китая запрещено строительство и эксплуатация угольных котельных и ТЭС. Кроме того, правительство Китая разработало программу, направленную на поэтапный перевод предприятий с нефтегазового на водоугольное топливо. Сегодня тематикой ВУТ в Китае занимаются три исследовательских центра, создан Государственный центр водоугольных технологий, работают шесть заводов по производству КЖТ, а на котельных и электростанциях при сжигании КЖТ производится до 2 млн. кВт энергии. К 2020 году в этой стране планируется довести производство КЖТ до 100 млн. тонн в

год. Крупнейшими проектами по внедрению КЖТ, реализованными в Китае, являются ТЭС в городах Маомин, Шаньтоу, Цзыбо, Жичжао, Тингдао [46].

Корпорация Mitsubishi в Японии разработала промышленную технологию производства и сжигания угольно-мазутных суспензий. С 1985 г. на электростанции в г. Юкосака такое топливо используют в двух агрегатах мощностью 265 МВт каждый. В г. Накасо проведены испытания установки мощностью 7,5 МВт, потребляющей 3,2 т/ч топлива. Испытаны также агрегаты мощностью 60 и 100 МВт с потреблением ВУТ до 21 т/ч. Ряд ТЭС Японии приморского базирования, на которых проведена необходимая модернизация систем сжигания и золоудаления, использует КЖТ в промышленном масштабе. Сжигание КЖТ производят совместно с мазутом в основном в ночное время или часы значительного снижения нагрузок. Производят КЖТ в Китае из обогащенного угля и доставляют в Японию танкерами.

Опыт перевода энергетических установок на сжигание КЖТ в России не так масштабен и успешен. Опытно-промышленное сжигание КЖТ проведено в 80-х годах прошлого столетия в рамках крупной межотраслевой правительственной программы на котлах ПК-40 Беловской ГРЭС и ТП-35 Мин-Кушской ТЭЦ. Выполненные на этих котлах испытания под руководством к.т.н. Хидиятова А.М., Джундубаева А.К., Осинцева В.В. показали, что переход от пылеугольного к суспензионному сжиганию сопровождался увеличением длины участка воспламенения и снижением его температурного уровня. Увеличение длительности процесса воспламенения приводило к затягиванию выгорания угольных частиц КЖТ, повышению температуры продуктов сгорания на выходе из топки и за котлом, совокупному увеличению потерь теплоты с уходящими газами и механическим недожогом топлива [130].

По результатам испытаний котлов ПК-40 и ТП-35 на КЖТ принят проект котла ТПЕ-214 Новосибирской ТЭЦ-5, предусматривающий помимо его основной работы на пылеугольном топливе возможность сжигания суспензионного сжигания. За период с 1989 г. по 1997 г. по трубопроводу доставлено на Новосибирскую ТЭЦ-5 около 350 тыс. м³ ВУТ. Сжигание КЖТ в котле привело к

небольшому снижению потерь теплоты с уходящими газами и дополнительным потерям на компрессию воздуха, однако позволило улучшить экологические показатели котла и снизить стоимость топлива. В последующем в связи с переводом котлов Беловской ГРЭС на новую экологически более чистую технологию сжигания угольной пыли от экзотермической утилизации шлама отказались.

Технология сжигания КЖТ по сравнению с традиционными способами сжигания угля имеет ряд преимуществ [126]: вовлечение угольных шламов и отходов углеобогащения; частичная или полная замена дорогостоящего мазута и других углеводородных топлив; снижение себестоимости единицы вырабатываемой тепловой энергии (в зависимости от соотношения цен на уголь и другие энергоносители); повышение взрывопожаробезопасности; возможность транспортировки по трубопроводам; снижение эксплуатационных затрат при хранении, транспортировании и сжигании ВУТ по сравнению с углем; снижение концентраций выбросов оксидов азота и серы. Однако при этом применение технологий КЖТ имеет ряд проблем в области приготовления, хранения, транспортировки и сжигания, каждая из которых вполне разрешима. Коротко рассмотрим каждую из выделенных проблем.

Приготовление КЖТ. Приготовление ВУТ состоит из трёх основных этапов (стадий) [127]: 1) предварительное дробление; 2) мокрый помол; 3) гомогенизация. Так как при проведении диссертационного исследования предусмотрено приготовление КЖТ на основе уже готовой суспензии – фильтр-кека, первая и вторая стадии исключены. Выполнялась гомогенизация (ввод стабилизаторов, пластификаторов и пр.), в результате которой КЖТ приобретало гомогенные свойства.

Хранение и транспортировка КЖТ. Длительное хранение КЖТ сопровождается его расслаиваемостью с осаждением угольных частиц. Для предотвращения расслаиваемости, увеличения статической стабильности, снижения вязкости суспензий применяют различные пластификаторы и добавки (ПАВ, стабилизаторы и т.д.), изменяющие стабильность, вязкость и иные свойства

КЖТ. Как правило, массовая доля таких добавок в топливе составляет около 1 % [127]. К тому же возможна транспортировка КЖТ по трубопроводам (успешный опыт транспортировки КЖТ по трубопроводу протяжённостью 262 км из Кемеровской в Новосибирскую область), в наливных танкерах (опыт поставки КЖТ из Китая в Японию), а также в железнодорожных цистернах.

Сжигание КЖТ. Начиная с 60–70 годов XX века активно реализуется опытно-промышленное сжигание КЖТ в котлах. Существует множество примеров [80,100,123–127,129,130] внедрения технологий КЖТ в практику: от перевода действующих установок на сжигание КЖТ [123–125] до создания нового оборудования (топок, форсунок и пр.) [80,127,129]. В настоящее время в России можно выделить несколько предприятий, которые занимаются разработкой проектов по внедрению технологий КЖТ на объектах теплоэнергетики: Научно-производственное объединение «Гидротрубопровод» (г. Москва), ЗАО Научно-производственное предприятие «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк), ООО «Амальтеа» (г. Москва).

На основании анализа результатов рассмотренных исследований можно сделать вывод о значительных перспективах внедрения КЖТ в качестве основного и дополнительного топлива на ТЭС. Появится возможность сделать важнейший шаг, позволяющий не только эффективно (с точки зрения экологических характеристик) утилизировать многочисленные аккумулированные отходы углеобогащения и нефтепереработки в составе КЖТ, но и существенно снизить потребление полезных ископаемых для получения тепловой и электрической энергии, а также минимизировать влияние теплоэнергетики на здоровье населения и состояние природы.

Как правило, большинство исследований выполнено в рамках одного из существующих направлений (таблица 1.3.1). В частности, к энергетическим характеристикам относятся теплота сгорания, расход топлива, минимальная температура зажигания, максимальная температура горения, время задержки инициирования горения. К реологическим характеристикам КЖТ относятся динамическая вязкость и стабильность. Экологические характеристики включают

в себя концентрации газовых антропогенных выбросов при сжигании КЖТ и зольный остаток. Техничко-экономические оценки заключаются в расчете экономии ресурсов при внедрении технологий КЖТ и сроков окупаемости. Нет обоснованных данных, позволяющих оценить эффективность (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) применения КЖТ на объектах энергетики, объединяющих в себе все основные значимые характеристики таких топлив. Таким образом, значительный интерес для развития энергетики представляет проведение комплексного технико-экономического обоснования использования композиционных жидких топлив с учетом их основных энергетических, экономических и экологических характеристик.

Выводы по первой главе

1. Проанализированы основные проблемы сжигания твердых топлив на тепловых электрических станциях, в частности вопросы приготовления, хранения, транспортировки и сжигания.
2. Выделены базовые компоненты перспективных суспензионных топлив: низкосортные угли, отходы углеобогачительных фабрик (шламы, фильтраты, промпродукт), твердые остаточные продукты переработки традиционных энергетических ресурсов (угля и нефти), отработанные индустриальные масла, нефтешламы, бытовые отходы и биомасса.
3. Выполнен анализ перспективных экологических решений для минимизации влияния твердотопливных ТЭС на окружающую среду, например, кислородное сжигание пылевидного угля, совместное использование угля и биомассы, применение в качестве топлив многокомпонентных суспензий.
4. Выполнен анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований композиционных жидких топлив, рассмотрены примеры опытно-промышленной реализации технологий КЖТ в теплоэнергетике и технико-экономической оценки внедрения таких

технологий, определены основные достижения, нерешенные задачи в данной области.

5. Сделано заключение о целесообразности проведения комплексного технико-экономического обоснования использования КЖТ с учетом их энергетических, экономических и экологических характеристик.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Исследование основных экологических характеристик сжигания композиционных жидких топлив

На рисунке 2.1.1 представлена схема стенда, используемого для исследования экологических характеристик сжигания КЖТ – концентраций NO_x и SO_x .

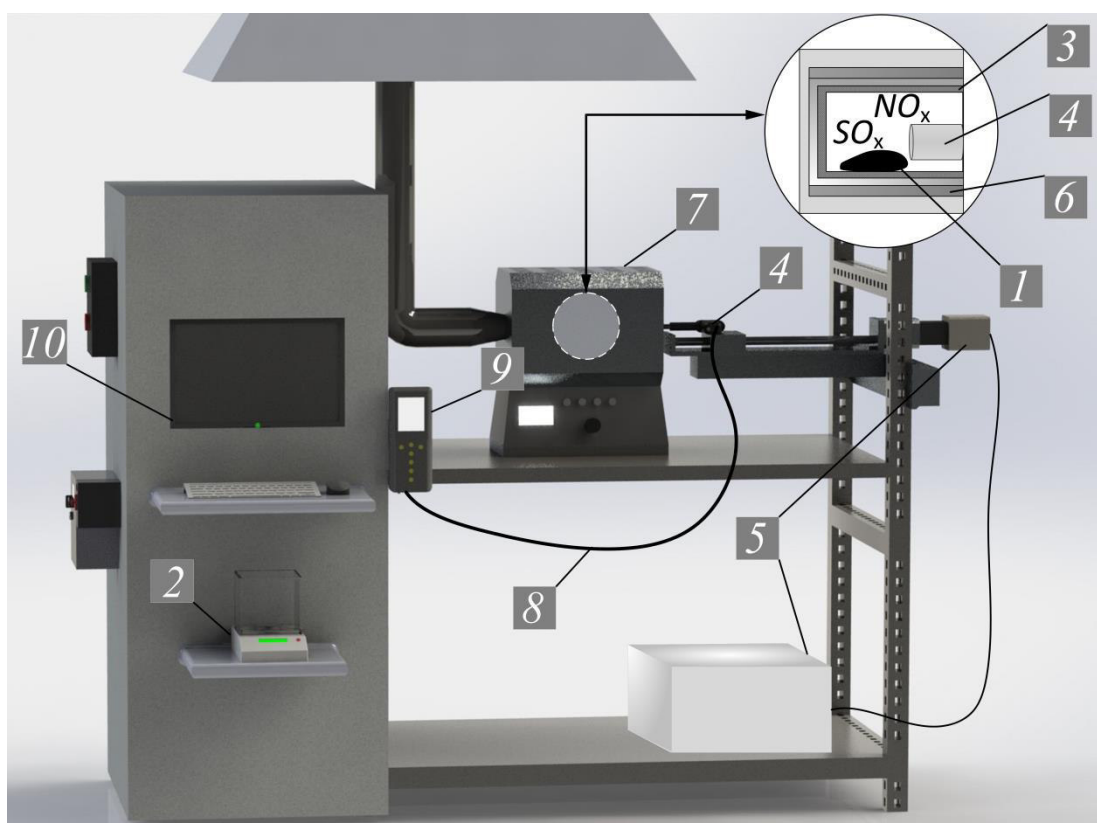


Рисунок 2.1.1. Схема экспериментального стенда: 1 – топливная навеска; 2 – аналитические весы; 3 – металлическая сетка; 4 – модульный зонд; 5 – координатный механизм; 6 – керамическая труба нагрева; 7 – муфельная печь; 8 – газоотборный шланг; 9 – газоанализатор; 10 – персональный компьютер [116].

При проведении экспериментов топливная навеска 1 взвешивалась при помощи аналитических лабораторных весов ViBRA HT 84RCE 2 (дискретность измерения – 10^{-5} г). Масса навески в каждом эксперименте составляла 1 грамм. Далее образец помещался в изготовленный из нержавеющей стальной сетки

(размер ячеек $0,5 \times 0,5$ мм) цилиндр 3 (высотой 0,05 м, диаметром основания 0,015 м). При помощи крепежных элементов цилиндр с топливной навеской фиксировался в горизонтальном положении на конце полого металлического стержня, внутри которого размещался модульный зонд газоанализатора 4. Собранная конструкция крепилась на координатный механизм 5, который в автоматическом режиме обеспечивал ее перемещение (со скоростью 0,5 м/с) в сквозную керамическую трубу нагрева 6 (диаметром 0,05 м, длиной 0,55 м) муфельной печи 7. Во время проведения эксперимента отверстие, через которое топливо помещалось в печь, герметично закрывалось минеральным теплоизоляционным материалом для устранения нерегламентированных подсосов воздуха.

Температура нагрева в экспериментах варьировалась в диапазоне 500–1000 °С. Контроль и установление необходимой температуры нагрева в камере сгорания выполнялся с помощью интегрированных регулятора и термопары типа S (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1400 °С, предел допускаемых отклонений ± 1 °С). Ввиду того, что исполнение печи однозонное, требуемый температурный режим с минимальными погрешностями (± 1 °С) обеспечивается именно в центральной части трубки.

Образующийся при горении топлива поток дымовых газов улавливался чувствительным элементом зонда 4. Далее по прочному газоотборному шлангу 8, подключенному к корпусу газоанализатора 9, отобранная проба поступала к измерительным сенсорам. Встроенный мембранный насос автоматически поддерживал постоянство потока дымовых газов к сенсорам, для защиты которых от высоких концентраций выбросов предусмотрена функция автоматической продувки сенсоров воздухом.

Корпус газоанализатора 9 подключался по интерфейсу USB к ПК 10, на котором установлено специализированное ПО, позволяющее в режиме реального времени отслеживать на экране текущие значения соответствующих концентраций в процессе измерений.

При дальнейшем рассмотрении и анализе участвовали средние концентрации выбросов NO_x и SO_x . В состав газоанализатора входит сенсор NO_x , который производит суммарное измерение концентраций NO и NO_2 , но на выходе отображается значение концентраций в виде NO_x . Что касается выбросов SO_x , то в условиях проведения данных экспериментальных исследований SO_2 является основным серосодержащим оксидом в дымовых газах, при этом наличие оксидов SO_3 не исключается, но предполагается, что их концентрации очень малы. Вычисление средних концентраций проводится с использованием метода прямоугольников. Площадь под кривой тренда разбивалась на множество прямоугольников, ширина которых соответствовала временному интервалу, а длина концентрациям рассматриваемого газа. Далее вычислялось произведение ширины и длины для каждого прямоугольника, после чего путем сложения всех произведений определялась суммарная площадь под кривой тренда рассматриваемого газообразного выброса. Среднее значение рассчитывалось как отношение найденной площади ко всему интервалу времени, в течение которого регистрировался выброс.

Для измерения концентраций газов применялся специализированный газоанализатор Testo 340, технические характеристики которого представлены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1. Технические характеристики газоанализатора Testo 340 [131]

Процесс	Диапазон измерений	Систематическая погрешность	Быстродействие
Измерение NO_x	0–4000 ппм *	± 5 ппм (0–99 ппм) ± 5 % от изм. знач. (100–1999 ппм) ± 10 % от изм. знач. (2000–4000 ппм)	< 30 с
Измерение SO_x	0–5000 ппм	± 10 ппм (0–99 ппм) ± 10 % от изм. знач. (в ост. диапазоне)	< 40 с

* ппм – единица измерения концентрации (1 ппм = 0,0001 %)

Исследования проведены с пятью самыми распространенными (относительная доля в энергетическом цикле развитых государств достигает 70–90% [4,132,133]) марками каменных углей: тощий («Т»), слабоспекающийся («СС»), коксующийся («К»), длиннопламенный («Д»), газовый («Г»). Также рассматривались типичные отходы углепереработки – фильтр-кеки (на основе каменных углей марок «К», «СС», «Т», «Г», «Д»).

В таблицах 2.1.2–2.1.4 приведены основные свойства исследованных каменных углей разных марок и соответствующих им фильтр-кеков.

Таблица 2.1.2. Свойства разных марок каменных углей и фильтр-кеков соответствующих марок [134]

Марка угля или фильтр-кека	W^a , %	Доля сухого вещества в кеке, %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
Фильтр-кек «К»	–	56,5	26,46	23,08	24,83
Уголь «К»	2,05	–	14,65	27,03	29,76
Фильтр-кек «Д»	–	43,2	36,99	41,47	19,24
Уголь «Д»	10,09	–	8,52	40,19	24,82
Фильтр-кек «Г»	–	47,0	33,82	43,11	22,16
Уголь «Г»	0,76	–	17,8	41,36	27,82
Фильтр-кек «СС»	–	62,1	50,89	30,16	15,23
Уголь «СС»	2,76	–	21,68	27,40	26,23
Фильтр-кек «Т»	–	60,9	21,20	16,09	26,92
Уголь «Т»	2,89	–	18,07	15,07	27,65

Таблица 2.1.3. Элементный состав разных марок каменных углей и фильтр-кеков соответствующих марок [134]

Марка угля или фильтр-кека	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %
Уголь «К»	79,79	4,486	1,84	0,868	12,70
Фильтр-кек «К»	87,20	5,090	2,05	1,022	4,46
Уголь «СС»	77,30	4,783	1,93	0,326	15,32
Фильтр-кек «СС»	87,47	5,039	2,15	0,444	4,77
Уголь «Т»	87,97	4,104	2,23	0,526	5,03
Фильтр-кек «Т»	90,13	4,255	2,31	0,441	2,77
Уголь «Г»	79,31	5,340	0,01	0,414	14,93
Фильтр-кек «Г»	75,12	4,638	0,02	0,226	19,99
Уголь «Д»	77,11	5,767	2,62	0,398	14,11
Фильтр-кек «Д»	73,27	4,904	0,02	0,218	21,59

Таблица 2.1.4. Результаты анализа характеристик фильтр-кеков в исходном (желейном) состоянии [134]

Фильтр-кек в исходном (влажном) состоянии	Массовая доля сухого вещества, %	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
Фильтр-кек «К»	56,5	14,1
Фильтр-кек «Д»	43,2	8,3
Фильтр-кек «Г»	46,9	10,4
Фильтр-кек «СС»	62,1	9,5
Фильтр-кек «Т»	60,9	16,4

Для приготовления органоводоугольных топлив на основе фильтр-кеков использовались два жидких горючих компонента, наиболее распространенных и существенно влияющих на свойства ОВУТ [89–91]: мазут и отработанное турбинное масло. В таблице 2.1.5 приведены основные характеристики этих компонентов.

Таблица 2.1.5. Результаты анализа характеристик жидких горючих компонентов [134]

Компонент	ρ при 293 К, кг/м ³	W^a , %	A^d , %	T_f , К	T_{ign} , К	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
отработанное турбинное	868	–	0,03	448	466	45,1
мазут	1000	6,12	4,06	438	513	39,4

Для повышения сегментарной стабильности (уменьшения эффекта расслоения) КЖТ использовался пластификатор (смачиватель) Неолас (таблица 2.1.6).

Таблица 2.1.6. Основные характеристики пластификатора [134]

Показатель	Значение
внешний вид	бесцветная жидкость
содержание ПАВ, % масс	25
рН раствора	6,5
плотность при 293 К, кг/м ³	954

Использованные методики определения свойств компонентов, а также приготовления топливных суспензий представлены в работе [91].

Приготовление составов КЖТ осуществлялось в соответствии с методикой [91], включающей следующие этапы:

- 1) Подготовка навесок компонентов смеси при помощи аналитических весов ViBRA HT 84RCE (дискретность измерения 10^{-5} г), исходя из расчета массы готового состава и соответствующих массовых долей компонентов.
- 2) Перемешивание компонентов осуществлялось в 2 этапа гомогенизатором ИКА Т 18 (также применялся гомогенизатор MPW-324) с диспергирующей насадкой в металлической емкости объемом 0,5 л (также использовались емкости объемом от 0,1 л до 1 л). Первоначально в емкость добавлялись жидкие компоненты (вода, масло, пластификатор) и перемешивались в течение 3 минут (жидкие компоненты добавлялись в состав в исходном состоянии). Затем в водомасляную эмульсию вводился угольный компонент. Длительность перемешивания компонентов составляла 10 минут.

2.2. Выбор оптимального состава КЖТ

Методика выбора оптимального состава КЖТ основывалась на пяти принципах [135]:

- 1) минимизация стоимости суспензионной композиции;
- 2) максимизация теплоты сгорания;
- 3) максимизация длительности процесса горения;
- 4) минимизация времени задержки зажигания (инерционности начальной стадии горения);
- 5) минимизация выбросов NO_x и SO_x .

Основные факторы, влияющие на выбор вида топливного компонента и композиции в целом, как правило, определяются потребителем в зависимости от целей, решаемых задач и требований. Наиболее распространенной является задача выбора топлива, характеризующегося максимальной теплотой сгорания и наименьшей стоимостью [54,136–139]. Для традиционных видов жидких и

твердых энергетических топлив методики выбора достаточно хорошо апробированы и обоснованы (информация о стоимости, теплоте сгорания, длительности горения и времени задержки зажигания таких топлив приведена во многих справочных и периодических изданиях). Однако для всего многообразия возможных составов композиционных жидких топлив (в частности, КЖТ) такие данные имеются лишь в ограниченном количестве [140].

С целью определения оптимального (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) компонентного состава КЖТ разработана экономическая модель, которая позволяет при заданных значениях стоимости и теплоты сгорания отдельных компонентов смеси, выбирать наиболее эффективный (с точки зрения основных энергетических и экономических характеристик) состав КЖТ (вид и концентрации основных компонентов), рассчитывать стоимость полученной смеси и ее теплоту сгорания (эксперименты [136,141,142] позволили сделать вывод об «аддитивном» механизме влияния компонентов на эти параметры в соответствии с относительной массовой или объемной концентрацией в суспензии).

Разработанная экономическая модель предполагает возможность сравнения различных составов КЖТ не только по соотношению «теплота сгорания / стоимость», но также и по длительности горения единицы объема смеси (на примере одиночной капли) и времени задержки зажигания (экспериментальные данные получены аналогично методикам [141,142]).

Наиболее эффективным (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) топливом выступает КЖТ, в состав которого входят компоненты с оптимальным (максимальным) соотношением теплоты сгорания и стоимости. С этой целью на первом этапе расчетов в модели внутри каждой из четырех групп компонентов (твердое горючее, жидкое горючее, вода, пластификатор) КЖТ проводилось ранжирование по удельному показателю «теплота сгорания / стоимость» (МДж/руб.). Для воды в рассмотрение принималась только возможная концентрация в КЖТ. В настоящей работе учитывались допустимые диапазоны изменения концентраций и стоимости используемых смачивателей. Информация

о стоимости и теплоте сгорания отдельных компонентов топлива принималась как среднее значение данных.

Далее для каждой из четырех групп компонентов КЖТ определялись составляющие с наилучшим (максимальным) интегральным показателем «теплота сгорания / стоимость» (МДж/руб.). Эти компоненты выбирались в состав оптимальной (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) суспензии. После фиксации состава КЖТ определялась доля каждого компонента в смеси. Компоненты КЖТ также ранжировались по удельному показателю «теплота сгорания / стоимость» (МДж/руб.). Наиболее эффективный (с точки зрения основных энергетических и экономических характеристик) компонент включался в смесь в пределах максимально допустимой относительной концентрации. Второй по эффективности компонент включался в смесь в максимально допустимом количестве (с соблюдением условия: 100 % – максимальное содержание первого компонента – минимальное содержание третьего компонента – минимальное содержание четвертого компонента). Третий компонент включался в смесь в максимально возможном количестве (с соблюдением условия: 100 % – максимальное содержание первого компонента – рассчитанное содержание второго компонента – минимальное содержание четвертого компонента). Содержание последнего по эффективности компонента определялось по остаточному принципу: 100 % – максимальное содержание первого компонента – рассчитанное содержание второго компонента – рассчитанное содержание третьего компонента (но не менее чем минимально допустимое содержание четвертого компонента в смеси).

На последнем этапе расчетов определялась стоимость (S_{Σ}) и теплота сгорания (Q_{Σ}) полученной оптимальной смеси КЖТ, исходя из данных о стоимости (S_i), теплоте сгорания (Q_i) и концентрации (γ_i) каждого компонента с учетом «эффективных» (осредняющих) соотношений:

$$S_{\Sigma} = \sum S_i \cdot \gamma_i;$$

$$Q_{\Sigma} = \sum Q_i \cdot \gamma_i,$$

где $i = \overline{1, n}$, n – количество компонентов в КЖТ ($n=4$).

На рисунке 2.2.1 представлен алгоритм выбора оптимального (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) состава КЖТ.

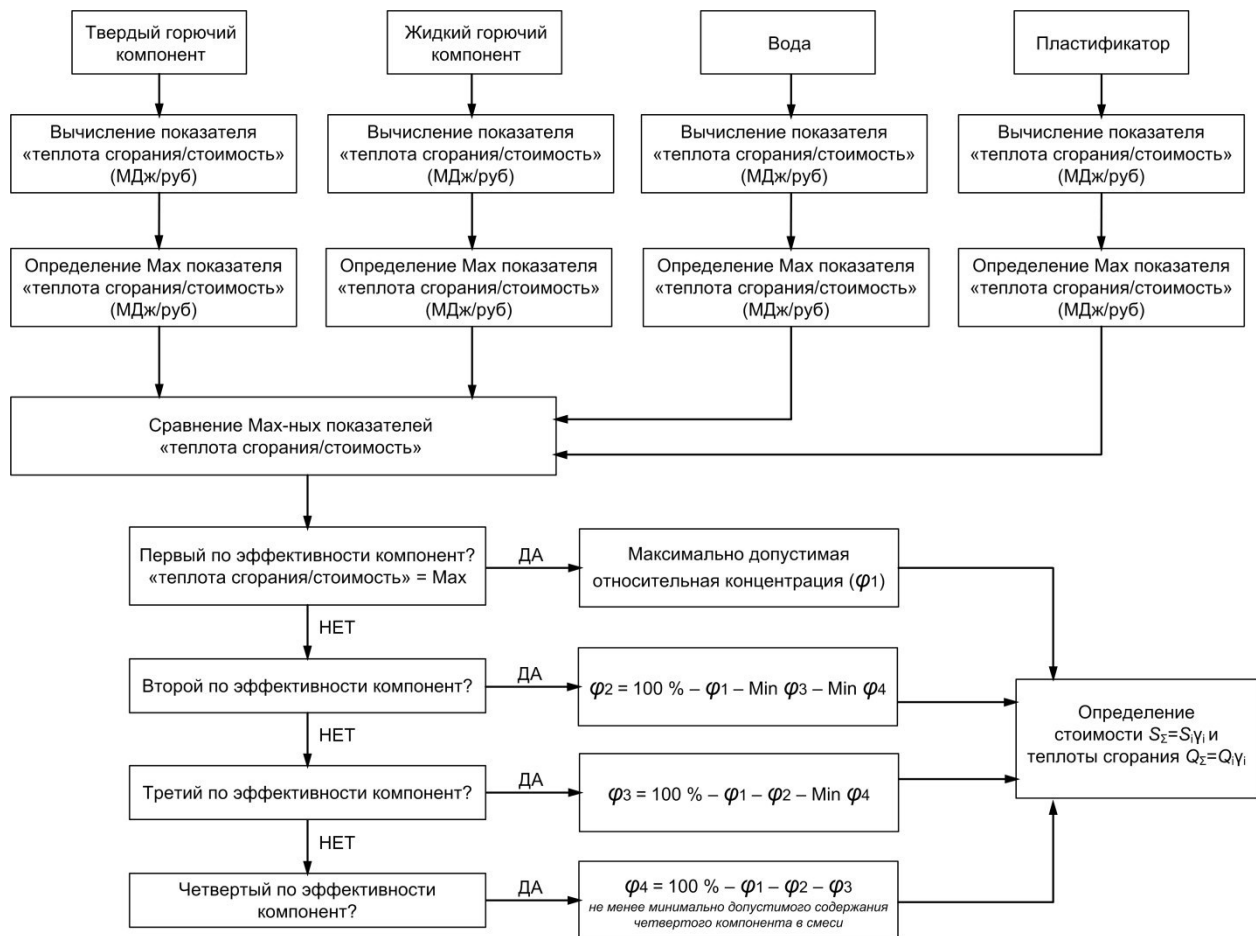


Рисунок 2.2.1. Алгоритм выбора оптимального состава КЖТ [107]

Примечание: максимальные и минимальные допустимые концентрации компонентов в смеси: твердый горючий компонент 40–60 %, жидкий горючий компонент 0–20%; вода 40–50 %, пластификатор 0,5–1%

2.3. Техничко-экономическое обоснование перехода на перспективные суспензии

Методика проведения технико-экономического обоснования перехода на перспективные КЖТ (на основе отходов угле- и нефтепереработки) реальных энергетических объектов проведена [143,144] на примере двух тепловых электрических станций и одной котельной, существенно отличающихся друг от друга количеством вырабатываемой тепловой и электрической энергии и

расходом топлива. Рассмотренные энергетические объекты расположены в Сибирском регионе Российской Федерации. Характеристики станций приведены в таблице 2.3.1. Данные о фактических расходах топлива на станциях (с учетом обеспечения их бесперебойной работы) в период 2012–2014 гг. приведены в таблице 2.3.2.

Таблица 2.3.1. Характеристики ТЭС и котельной [143,145,146]

Характеристики	Станция № 1	Станция № 2	Станция № 3 (котельная)
Тепловая мощность, Гкал/ч	800	780	1.2
Электрическая мощность, МВт	300	140	—
Вид топлива	Каменный уголь марки «Д», природный газ, мазут (для растопки)	Природный газ, мазут (резервное топливо)	Каменный уголь марки «Д»

Таблица 2.3.2. Расход топлива и изменения структуры топливного баланса ГРЭС-2 за 2012–2014 гг. [143,145,146]

Топливо	2012 год			2013 год			2014 год		
	т/ тыс. м ³	тут	%	т/ тыс. м ³	Тут	%	т/ тыс. м ³	тут	%
Станция № 1									
Уголь	415200	371200	45	389900	348500	52	425400	380300	51
Газ	402100	462400	55	260400	299500	48	307700	353900	49
Итого	—	833600	100	—	648000	100	—	734200	100
Станция № 2									
Мазут	10000	14000	0,1	10000	14000	0,1	10000	14000	0,1
Газ	402416	382500	99,9	344100	391000	99,9	336700	382500	99,9
Итого	—	396500	100	—	405000	100	—	396500	100
Станция № 3									
Уголь	1000	908,6	100	1000	947,6	100	956,5	855,1	100
Итого	1000	908,6	100	1000	947,6	100	956,5	855,1	100

На основании имеющихся данных о виде топлива, его энергетических характеристиках, стоимости и расходе проведена оценка экономического эффекта

от перехода рассматриваемых станций и котельной на КЖТ. Целесообразно сравнение положительных и отрицательных денежных потоков, формирующихся за счет уменьшения или увеличения издержек. При этом выручка от реализации электрической и тепловой энергии не учитывается в формировании показателей окупаемости перехода на КЖТ, так как она практически не зависит от вида сжигаемого топлива, а определяется потребностями абонентов и действующими тарифами.

Главными преимуществами применения КЖТ являются снижение топливных затрат при сжигании более дешевого топлива, а также выгода за счет снижения выбросов в атмосферу и применение более безопасного производства.

В качестве основных рассматривались следующие статьи затрат [144]:

- 1) топливные затраты (включают приобретение компонентов КЖТ и транспорт их до станции);
- 2) эксплуатационные затраты (на электроэнергию, необходимую для приготовления суспензий);
- 3) капитальные затраты (на систему топливного хозяйства);
- 4) затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов (ЗШО);
- 5) затраты экологические мероприятия или уплату штрафов.

Топливные затраты

В связи с тем, что на трех рассматриваемых станциях применяется каменный уголь «Д», в настоящей работе рассмотрены составы КЖТ на его основе и отходов его переработки (фильтр-кеков) (табл.2.2.3). Остальные компоненты КЖТ определены по показателям эффективности смеси (в соответствии с заключениями [36,115,146]): наименьшая стоимость КЖТ при наибольшей теплоте сгорания, минимальное время зажигания, максимальная длительность горения, доступность компонента в регионе. Стоимости составов КЖТ (без учета затрат на приготовление) приведены в таблице 2.3.3.

Таблица 2.3.3. Состав, характеристики и стоимость КЖТ [143,145,146]

№ п/п	Содержание компонента в КЖТ	Наименование компонента в КЖТ	Стоимость КЖТ, руб./т	Теплота сгорания КЖТ, ГДж/т	Приоритет по соотношению теплота сгорания/стоимость КЖТ, МДж/руб	Время задержки зажигания, с	Длительности горения, с
						На основе результатов экспериментов [6, 7] с каплями радиусом 1 мм	
1	49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	249,1	20,9	1	7–9	16–18
	10,0%	Фусы					
	0,5%	ЩКПК					
	40,0%	Техническая вода					
2	49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	279,1	21,1	2	6–9	14–17
	10,0%	Нефтяные отложения					
	0,5%	ЩКПК					
	40,0%	Техническая вода					
3	15,0%	Фусы	773,3	21,6	3	4–6	12–15
	44,5%	Каменные угли					
	0,5%	ЩКПК					
	40,0%	Техническая вода					
4	49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	1018,3	21,1	4	5–7	11–13
	10,0%	Моторное масло					
	0,5%	ЩКПК					
	40,0%	Техническая вода					

Стоимости компонентов КЖТ приняты с учетом средних рыночных цен (могут меняться в зависимости от конкретного поставщика) в период 2018–2019 гг., а также предполагаемых затрат на их транспортировку. Фактическая ставка платы за забор воды принималась средней для Сибирского региона РФ – 311 руб./тыс. м³ [144,146].

Текущие топливные затраты (руб./год):

$$S_1 = C_T \cdot G_T, \quad (2.3.1)$$

где C_T – среднерыночная цена топлива с учетом транспортировки (руб./т); G_T – требуемый расход сжигаемого топлива (т/год).

Количество тепла, выделяющееся при сжигании требуемого расхода традиционного топлива (уголь, мазут, газ) за год (Дж/год):

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{т}} \cdot G_{\text{т}}, \quad (2.3.2)$$

где $Q_{\text{т}}$ – удельная теплота сгорания топлива (Дж/кг).

Удельная теплота сгорания КЖТ (определяется как сумма теплот сгорания компонентов КЖТ с учетом их относительной массовой концентрации в суспензии [91]) (Дж/кг):

$$Q_{\text{КЖТ}} = \sum_n^{i=1} Q_i \cdot \phi_i, \quad (2.3.3)$$

где Q_i – теплота сгорания i -го компонента КЖТ (Дж/кг); ϕ_i – относительная массовая концентрация i -го компонента в суспензии.

Требуемый расход КЖТ (т/год):

$$G_{\text{КЖТ}} = Q_{\text{год}} / Q_{\text{КЖТ}}, \quad (2.3.4)$$

где $Q_{\text{год}}$ – теплота сгорания, выделяющаяся при сжигании традиционного топлива (Дж/год).

Расход i -го компонента КЖТ (т/год):

$$G_i = G_{\text{КЖТ}} \cdot \phi_i. \quad (2.3.5)$$

Затраты на КЖТ:

$$S_2 = \sum_n^{i=1} C_i \cdot G_i, \quad (2.3.6)$$

где C_i – среднерыночная цена i -го компонента КЖТ с учетом транспортировки (руб./т).

Эксплуатационные затраты

В качестве данной статьи затрат рассматривались текущие расходы станций на электроэнергию, необходимую для приготовления суспензионных топлив. В настоящее время известно несколько способов приготовления КЖТ [147–150], которые базируются на технологиях тонкодисперсного измельчения углей, смешивания их с водой, применения пластификаторов и стабилизаторов. Для сравнения рассмотрены две методики: с применением гомогенизатора и шаровой барабанной мельницы (ШБМ).

Приготовление КЖТ с использованием гомогенизатора проводится в несколько этапов [136,142]. На первом готовится водомасляная эмульсия. На втором этапе в емкость с приготовленной эмульсией вводится твердый компонент (уголь или фильтр-кек). Все компоненты перемешиваются гомогенизатором в течение заданного времени (как правило, до 10 минут).

Приготовление КЖТ с использованием шаровой барабанной мельницы основано на кавитационном [148] измельчении угля в водной среде. В состав мельницы входит барабан, мелющие шары и специализированные валки. В барабан засыпается уголь или фильтр-кек и шары. После этого заливаются жидкие компоненты (вода, масло, фусы, нефтяные отложения или пластификатор). Приготовление КЖТ с применением мельницы проводится в течение более длительных периодов (от получаса до нескольких часов) по сравнению с гомогенизаторами.

В [149] показано, что КЖТ, полученные с использованием обеих методик, имеют схожие свойства. Поэтому обосновано применение более рационального метода – с применением гомогенизатора (стоимость учтена в затратах на систему топливного хозяйства). Рассчитывались эксплуатационные затраты, необходимые для приготовления топлива (затраты на электрическую энергию).

Расчет эксплуатационных затрат при использовании способа приготовления с помощью гомогенизатора приведен ниже.

Число циклов работы в год (шт./год):

$$c = G_{\text{КЖТ}} / m_3, \quad (2.3.7)$$

где $G_{\text{КЖТ}}$ – требуемый расход КЖТ; m_3 – масса загрузки топлива (т).

Общее время работы установки для приготовления состава КЖТ (ч/год):

$$T = c \cdot t, \quad (2.3.8)$$

где t – время работы установки (ч), принято 13 минут.

Расход электроэнергии в год на приготовление КЖТ (кВт·ч/год):

$$G_3 = n \cdot T \cdot N, \quad (2.3.9)$$

где n – количество установок (шт.); N – мощность двигателя установки (кВт).

Затраты на электроэнергию для приготовления КЖТ (руб./год):

$$S_3 = G_3 \cdot C_3, \quad (2.3.10)$$

где C_3 – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

Капитальные затраты

Капитальные затраты представляют затраты на приобретение оборудования системы топливного хозяйства на станции, а также на ее переоборудование.

Согласно данным табл. 2.3.1 на станции № 1 топливное хозяйство реализовано для каменного угля, природного газа и мазута, на станции № 2 – для природного газа и мазута, на станции № 3 – для каменного угля. Для выполнения расчетов капитальных затрат рассмотрены типичные технологические схемы топливных хозяйств для каждого вида топлива (твердого, жидкого и газового). Далее вычислялись затраты на систему топливного хозяйства для КЖТ согласно двум возможным вариантам ее создания.

Первый вариант подразумевал переоборудование существующей системы топливного хозяйства на станции путем сохранения нужных (исключения лишних) элементов и дополнения необходимым оборудованием.

Второй подразумевал создание полностью новой системы топливного хозяйства.

При расчете затрат на систему топливного хозяйства приняты среднерыночные цены входящего в нее оборудования.

На рассмотренных станциях для приготовления угольной пыли используются шаровые барабанные мельницы (ШБМ). Технические характеристики мельниц приведены в [150]. В частности, на станции № 1 используется ШБМ 287/410. Расчетное время приготовления смеси КЖТ на одной мельнице при однократной загрузке принято 1 час. Стоимость одного гомогенизатора составляет порядка 700 тыс. руб. В связи с тем, что приготовление смеси КЖТ должно производиться непосредственно перед подачей в котел, для подготовки топлива на станции № 1 необходимо предусмотреть не менее 10 гомогенизаторов (по одному гомогенизатору на каждый котел) и 2 гомогенизатора в резерве. Общие капитальные затраты на

покупку гомогенизаторов составят 8,4 млн. руб. Время приготовления КЖТ принято 13 минут.

Затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов.

Снижение затрат станции за счет увеличения доли сжигания угля приводит к росту площадей полигона ЗШО. В то время как переход на КЖТ не приведет к увеличению ЗШО, т.к. доля угля в топливном балансе существенно не изменяется. Соответственно, дополнительных затрат на складирование и утилизацию золошлаковых отходов не требуется.

Затраты на экологические мероприятия или уплату штрафов.

Применение КЖТ исключает необходимость в проведении специальных мероприятий, направленных на снижение выбросов в атмосферу. Например, замена существующих горелочных устройств на низкоэмиссионные, подача газов рециркуляции в горелки, внедрение двухступенчатой системы сжигания, замена существующих золоулавливающих установок на эмульгаторы с КПД золоулавливания на уровне 99,5 %. Это связано с тем, что при сжигании КЖТ не происходит превышения установленных норм выбросов.

К тому же отсутствует проблема, связанная с пылением склада угля в летний период в сухую ветреную погоду (особенно актуально для станций, расположенных в городской черте). В связи с этим исключается необходимость в мероприятиях, направленных на снижение запыленности угольного склада, например, строительство закрытого угольного склада, применение ветрозащитного ограждения по периметру угольного склада или применение установок пылеподавления (установка туманообразующих пушек). Все эти мероприятия также являются весьма затратными, в то время как переход на КЖТ позволяет минимизировать данную проблему, т.к. фильтр-кеки являются влажными отходами углепереработки.

Применение угля характеризуется еще одной проблемой – возгорание угольной пыли в бункерах котлов (угли марки «Д» характеризуются повышенной взрывоопасностью). Основными причинами возгораний может служить: пересушка пыли в результате превышения температуры аэросмеси; отложения

пыли в тракте систем пылеприготовления из-за конструктивных недостатков тракта; отсутствие заполнения бункера пыли инертными газами на остановленной пылесистеме; недостаточная плотность бункеров пыли. Проблему возгорания угольной пыли в бункерах без дополнительных мероприятий позволяет решить переход на КЖТ, т.к. топливо в котел подается в жидко-дисперсном состоянии.

2.4. Вычисление комплексного параметра эффективности применения КЖТ

Оценить эффективность сжигания топлива, в частности суспензионного, по измеренным экологическим или энергетическим показателям не всегда возможно. Зачастую требуется учитывать и другие характеристики процесса, например, экономические или социальные аспекты, а также совокупную оценку ряда факторов. В таких случаях используют методики мультикритериального анализа (multiple-criteria decision-making (MCDM)) [151]. Мультикритериальные методы оценки применяются с целью анализа одновременного воздействия ряда факторов на какую-либо систему или группу характеристик на основе имеющихся разрозненных данных о параметрах процесса. MCDA позволяет находить оптимальное решение в условиях большого количества неупорядоченных аргументов; обеспечивает последовательный и воспроизводимый процесс принятия решений путем использования единого подхода. Во многих научных исследованиях применялись подходы MCDM для разных областей науки и техники, и эта тенденция усиливается на протяжении многих лет [151]. В рамках данного направления оценка эффективности применения суспензионных топлив также представляет интерес. Однако таких работ опубликовано не много. В рамках данного диссертационного исследования предложено два подхода к расчету комплексного параметра эффективности применения КЖТ, которые базируются на основных принципах методов MCDM.

2.4.1. Первый подход

Для оценки основных преимуществ применения суспензий определены относительные экологические, экономические и энергетические показатели в

сравнении с углем [152,153]. Рассмотрены три перспективные суспензии: КЖТ 1 (100 % фильтр-кек угля марки «Т» в желеобразном исходном состоянии); КЖТ 2 (89% фильтр-кек угля марки «Т», 10% мазут, 1% пластификатор), КЖТ 3 (89% фильтр-кек угля марки «Т», 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор).

В качестве основного относительного показателя по антропогенным выбросам принято отношение средних концентраций NO_x и SO_x при сжигании угля к аналогичным параметрам, соответствующим экспериментам с суспензиями [152]:

$$A_{\text{КЖТ}}^{\text{NO}_x} = \text{NO}_x \text{ угля} / \text{NO}_x \text{ КЖТ}; \quad (2.4.1)$$

$$A_{\text{КЖТ}}^{\text{SO}_x} = \text{SO}_x \text{ угля} / \text{SO}_x \text{ КЖТ}. \quad (2.4.2)$$

Рассчитан общий относительный показатель по антропогенным выбросам от сжигания КЖТ, приготовленных на основе всех исследованных фильтр-кеков [152]:

$$A_{\text{КЖТ}} = A_{\text{КЖТ}}^{\text{NO}_x} \cdot A_{\text{КЖТ}}^{\text{SO}_x}. \quad (2.4.3)$$

Основным энергетическим показателем топлива принято считать теплоту сгорания. Как следствие, в качестве основного интегрального энергетического параметра целесообразно рассмотреть относительное изменение теплоты сгорания КЖТ по сравнению с исходными углями [152]:

$$M_{\text{КЖТ}} = Q_{s, \text{V КЖТ}}^a / Q_{s, \text{V уголь}}^a. \quad (2.4.4)$$

В качестве относительного экономического показателя принято отношение стоимости угля и КЖТ [152]:

$$P_{\text{КЖТ}} = C_{\text{уголь}} / C_{\text{КЖТ}}. \quad (2.4.5)$$

При этом целесообразно учитывать среднюю рыночную стоимость компонентов исследованных топлив. В таблице 2.4.1 приведены значения стоимости топливных компонентов в России (Сибирский регион).

Таблица 2.4.1. Значения среднерыночной стоимости и концентраций компонентов КЖТ [152]

№	Компонент	Стоимость* (C_i), руб./кг	Массовая концентрация (φ), %
1	Каменный уголь	0,7–2,9	100
2	Фильтр-кек каменного угля	0,2–0,5	89–100
3	Мазут	11–27	10
4	Отработанное турбинное масло	9–17	10

* указаны среднерыночные цены за 2017–2018 гг.; значения не являются фиксированными и могут меняться в зависимости от конкретного поставщика

Обобщенный интегральный показатель, учитывающий основные экологические, экономические и энергетические характеристики, может быть представлен в двух вариантах. *Первый вариант* – одновременный учет вычисленных весовых коэффициентов (экология, экономика и энергетика) [152]:

$$B_{\text{КЖТ}} = A_{\text{КЖТ}} \cdot M_{\text{КЖТ}} \cdot P_{\text{КЖТ}}. \quad (2.4.6)$$

Второй вариант – вычисление коэффициента, характеризующего количество энергии, которая выделится при сжигании 1 кг топлива, с учетом его стоимости и концентрации образующихся при горении выбросов NO_x и SO_x [152]:

$$D_{\text{КЖТ}}^{\text{NO}_x} = Q_{s, \text{v КЖТ}}^a / (C_{\text{КЖТ}} \cdot \text{NO}_x \text{ КЖТ}); \quad (2.4.7)$$

$$D_{\text{КЖТ}}^{\text{SO}_x} = Q_{s, \text{v КЖТ}}^a / (C_{\text{КЖТ}} \cdot \text{SO}_x \text{ КЖТ}). \quad (2.4.8)$$

2.3.2. Второй подход

С целью оценки достоинств и недостатков КЖТ по сравнению с углем введен комплексный параметр эффективности (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик), учитывающий следующие параметры [154,155]: теплота сгорания и расход топлива; антропогенные выбросы и зольный остаток; максимальная температура горения; минимальные температуры зажигания; времена задержки инициирования горения; стоимость компонентов; технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания топлива;

пожаровзрывобезопасность. По каждому из показателей выполнены оценки с учетом разных компонентных составов КЖТ.

Теплота сгорания и расход топлива

Относительные показатели по теплоте сгорания КЖТ в сравнении с углем вычислены по формуле [155]:

$$Q_{\text{отн}} = Q_{\text{КЖТ}} / Q_{\text{уголь}}. \quad (2.4.9)$$

Относительные показатели по массе топлива КЖТ, необходимой для получения 20 МДж энергии, в сравнении с углем вычислены по формуле [155]:

$$G_{\text{отн}} = G_{\text{КЖТ}} / G_{\text{уголь}}. \quad (2.4.10)$$

Антропогенные выбросы и зольный остаток

Для оценки преимущества применения КЖТ по сравнению с углем рассчитаны относительные показатели по выбросам NO_x и SO_x и по массе золы [155]:

$$A_{\text{NO}_x \text{ отн}} = \text{NO}_x \text{ КЖТ} / \text{NO}_x \text{ уголь}; \quad (2.4.11)$$

$$A_{\text{SO}_x \text{ отн}} = \text{SO}_x \text{ КЖТ} / \text{SO}_x \text{ уголь}; \quad (2.4.12)$$

$$M_{\text{отн}} = M_{\text{КЖТ}} / M_{\text{уголь}}. \quad (2.4.13)$$

Максимальная температура горения

В соответствии с экспериментальной методикой [124] определены максимальные температуры T_d^{max} , достигаемые при горении суспензий и углей. Отношения максимальных температур горения КЖТ в сравнении с углем вычислены по формулам [155]:

$$T_{d \text{ отн}}^{\text{max}} = T_d^{\text{max}} \text{ КЖТ} / T_d^{\text{max}} \text{ уголь}. \quad (2.4.14)$$

Минимальные температуры зажигания и времена задержки инициирования горения

В соответствии с экспериментальными методиками [71] определены минимальные (пороговые) температуры T_g^{min} , необходимые для зажигания КЖТ и углей, установлены времена задержки зажигания топлив τ_d при идентичных температурах нагрева воздушным потоком T_g .

Отношения минимальных температур и времен задержки зажигания суспензий в сравнении с углем вычислены по формулам [155]:

$$T_{g \text{ отн}}^{\min} = T_{g \text{ КЖТ}}^{\min} / T_{g \text{ уголь}}^{\min}; \quad (2.4.15)$$

$$\tau_{d \text{ отн}} = \tau_{d \text{ КЖТ}} / \tau_{d \text{ уголь}}. \quad (2.4.16)$$

Пожаровзрывобезопасность

Использование суспензий характеризуется более высокими температурами зажигания, более длительными временами прогрева перед зажиганием, а также меньшими температурами горения. Эти три показателя являются основной причиной существенно более высокой пожаровзрывобезопасности КЖТ по сравнению с угольными топливами. Как следствие, относительный показатель пожаровзрывобезопасности $P_{\text{отн}}$ топлив можно оценить с использованием трех указанных параметров по формуле [155]:

$$P_{\text{отн}} = T_{g \text{ отн}}^{\min} \cdot \tau_{d \text{ отн}} \cdot T_{d \text{ отн}}^{\max}. \quad (2.4.17)$$

Стоимость компонентов и технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания

В соответствии со среднерыночной стоимостью компонентов КЖТ определены преимущества суспензионных топлив в сравнении с углем. Также приведены суммарные технико-экономические показатели по топливоподготовке в соответствии с методикой [135]. Вычислены относительные показатели по стоимости суспензий в сравнении с углем. Определены затраты на хранение, транспортировку и сжигание КЖТ в качестве основного топлива (взамен угля) на тепловых электрических станциях:

$$S_{\text{отн}} = S_{\text{КЖТ}} / S_{\text{уголь}}; \quad (2.4.18)$$

$$N_{\text{отн}} = N_{\text{КЖТ}} / N_{\text{уголь}}. \quad (2.4.19)$$

Стоимость рассматриваемых суспензий определялась исходя из среднерыночных цен компонентов, входящих в топливо, и их концентраций в нем (табл. 2.4.1):

$$S_{\text{КЖТ}} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \varphi_i, \quad (2.4.20)$$

где C_i – среднерыночная цена i -го компонента КЖТ с учетом транспортировки (руб./т); φ_i – концентрация i -го компонента в КЖТ.

Основываясь на методике [135] получены значения затрат на хранение, транспортировку и сжигание угля (основного топлива), а также КЖТ (в качестве основного топлива) на тепловой электрической станции № 1 (табл. 2.3.1). Далее получены соответствующие отношения $N_{\text{отн}}$.

Обобщение результатов выполненных исследований и рекомендации по их использованию

Для обобщения полученных результатов введен в рассмотрение параметр, позволяющий выполнять оценки перспективности использования КЖТ с разными компонентными составами в сравнении с углем. Этот параметр можно в первом приближении принять (в соответствии с основными положениями классических теорий управления и принятия решений [156]) как сумму (или произведение) всех относительных параметров, рассмотренных выше [155]:

$$I_{\text{отн } 1} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] + [\gamma_2 \cdot G_{\text{отн}}] + [\gamma_3 \cdot A_{\text{NOx отн}} \cdot A_{\text{SOx отн}}] + \\ + [\gamma_4 \cdot M_{\text{отн}}] + [\gamma_5 \cdot P_{\text{отн}}] + [\gamma_6 \cdot S_{\text{отн}}] + [\gamma_7 \cdot N_{\text{отн}}]; \quad (2.4.21)$$

$$I_{\text{отн } 2} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_2 \cdot G_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_3 \cdot A_{\text{NOx отн}} \cdot A_{\text{SOx отн}}] \cdot \\ \cdot [\gamma_4 \cdot M_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_5 \cdot P_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_6 \cdot S_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_7 \cdot N_{\text{отн}}]. \quad (2.4.22)$$

где γ_i – весовые коэффициенты (в первом приближении можно роль всех перечисленных факторов считать равнозначной, тогда $\gamma_i=1$, $i=1\dots n$, где n – количество учитываемых факторов).

Если учитывать главным образом преимущества суспензий над углями, то целесообразно использовать комплексный параметр [155]:

$$J_{\text{отн } 1} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] + [\gamma_2 \cdot 1/G_{\text{отн}}] + [\gamma_3 \cdot 1/A_{\text{NOx отн}} \cdot \\ \cdot 1/A_{\text{SOx отн}}] + [\gamma_4 \cdot 1/M_{\text{отн}}] + [\gamma_5 \cdot 1/P_{\text{отн}}] + [\gamma_6 \cdot 1/S_{\text{отн}}] + [\gamma_7 \cdot 1/N_{\text{отн}}]; \quad (2.4.23)$$

$$J_{\text{отн } 2} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_2 \cdot 1/G_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_3 \cdot 1/A_{\text{NOx отн}} \cdot \\ \cdot 1/A_{\text{SOx отн}}] \cdot [\gamma_4 \cdot 1/M_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_5 \cdot 1/P_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_6 \cdot 1/S_{\text{отн}}] \cdot [\gamma_7 \cdot 1/N_{\text{отн}}]. \quad (2.4.24)$$

Оба варианта расчета базируются на основных принципах MCDM (Multiple-criteria decision-making) и очень близки к общеизвестному подходу WSM (weight sum method), который часто применяется в энергетическом секторе ввиду его универсальности и простоты производимых расчетов [157,158].

Выводы по второй главе

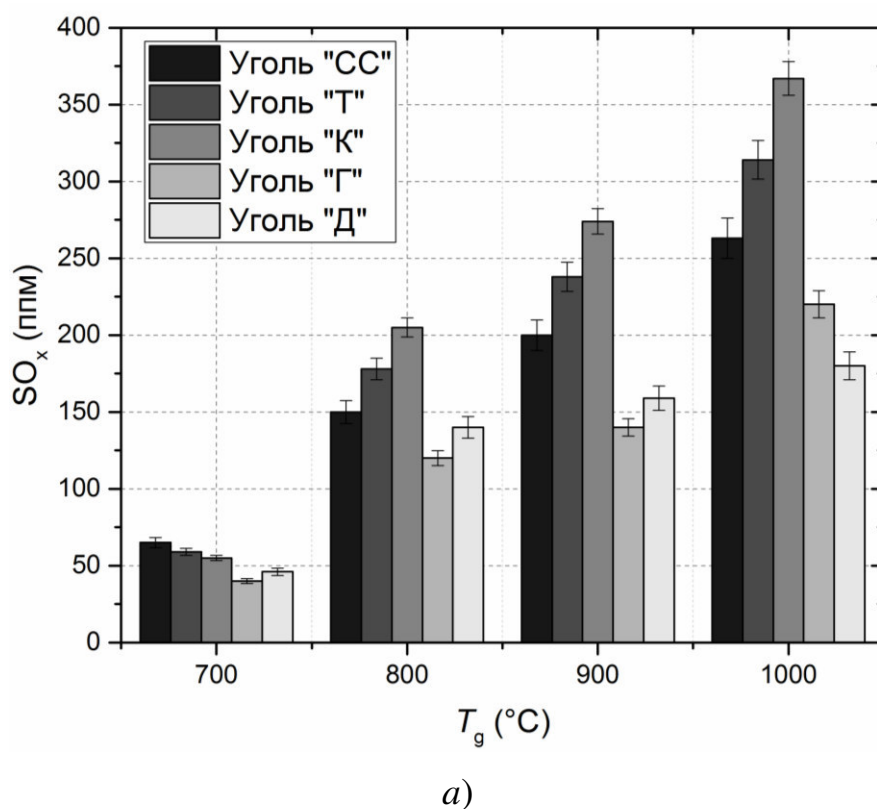
1. Разработана схема и смонтирован экспериментальный стенд для исследования экологических характеристик (выбросов SO_x и NO_x) сжигания композиционных жидких топлив с использованием муфельной печи и газоанализирующей системы.
2. Разработана методика регистрации концентраций выбросов SO_x и NO_x при сжигании навески топлива.
3. Разработан новый подход к проведению комплексного технико-экономического обоснования (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) применения КЖТ на тепловых электрических станциях и котельных взамен традиционного топлива, отличающийся от известных учетом наиболее значимых энергетических, экологических и экономических характеристик используемых топлив.
4. Разработанный подход базируется на принципах мультикритериального анализа (MCDM) большого объема данных, который дает возможность проведения сравнительной оценки перспективности использования суспензионных технологий на основе стандартных критериев и параметров.
5. Разработанная экономическая модель позволила произвести сравнение различных составов КЖТ с учетом большой группы определяющих параметров: теплота сгорания, расход топлива, антропогенные выбросы и зольный остаток, минимальная температура зажигания и время задержки инициирования горения, максимальная температура горения, пожаровзрывобезопасность, стоимость компонентов и технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания.

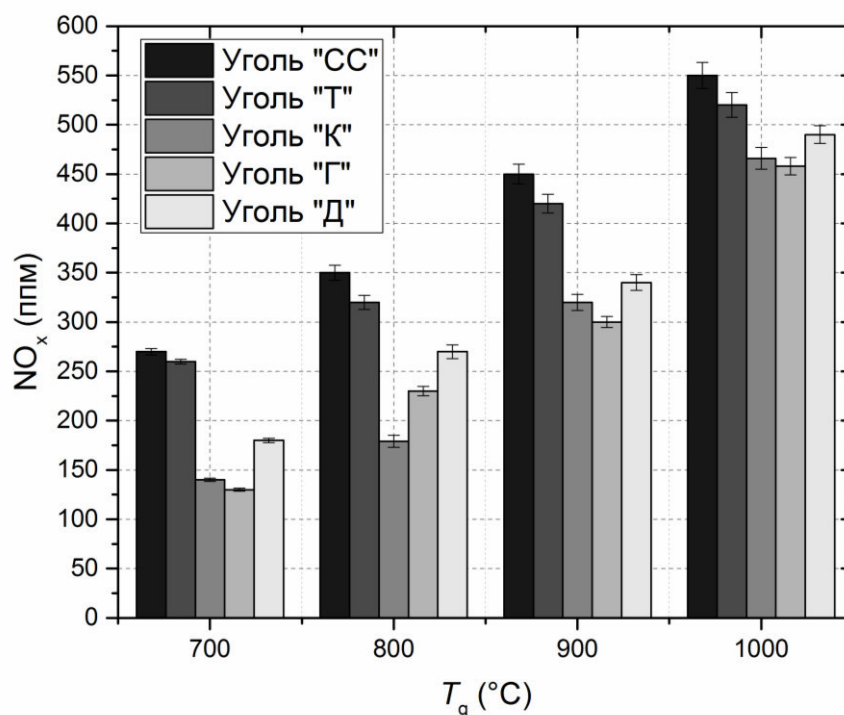
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Результаты экспериментальных исследований экологических характеристик сжигания композиционных жидких топлив

3.1.1. Концентрации выбросов NO_x и SO_x при сжигании каменных углей различных марок

На рисунке 3.1.1 приведены основные результаты выполненных исследований [152,153,159–161], иллюстрирующие характерные концентрации NO_x и SO_x при сжигании каменных углей разных марок в пылевидном состоянии.





б)

Рисунок 3.1.1. Экспериментальные зависимости концентраций SO_x (а) и NO_x (б) от температуры в камере сгорания при сжигании каменных углей разных марок [152,153,159–161]

В результате анализа экспериментальных зависимостей (рисунок 3.1.1) установлено, что с ростом температуры в камере сгорания концентрации SO_x и NO_x возрастают. Высокое содержание в топливе летучих газообразных веществ (V^{daf}) способствует его зажиганию при более низких температурах, а снижение температуры, в свою очередь, ведет к снижению концентраций выбросов SO_x и NO_x [61,152,159–161].

Процессы образования оксидов серы при сжигании угольного топлива в большей мере зависят от содержания органических соединений серы (S^{daf}) в разных образцах. Так, например, содержание серы в угле марки «К» составляет 0,868 % (таблица 2.1.3), что выше, чем у других рассмотренных марок углей. Это и определяет максимальное количество выбросов SO_x при его сжигании (рисунок 3.1.1, а).

Эксперименты показали, что температура сжигания существенно влияет на динамику выхода NO_x при горении углей (рис. 3.1.1, б).

Оксиды азота образуются при горении за счет окисления азота воздуха только при высоких температурах [61] и за счет азота в топливе, находящегося в сложных органических соединениях, входящих в состав топлива. Образование оксидов азота при высокотемпературном сжигании топлива обусловлено в основном окислением молекулярного азота воздуха непосредственно в зоне горения. При низкотемпературном сжигании топлива увеличивается доля оксидов азота, образовавшихся в результате окисления связанного азота, входящего в состав топлива. Этот процесс происходит легче и быстрее, чем окисление молекулярного азота воздуха при относительно низких температурах, например, для угля при 250–280 °С. Максимальный выход оксидов азота наблюдается в зоне активного горения [162,163]. В остальных зонах, где уровень температуры относительно ниже, атмосферный азот практически не окисляется. Это означает, что снижение температуры горения топлива способствует уменьшению содержания оксидов азота в выбросах [152,159–161].

Основное образование топливных оксидов азота начинается при температурах выше 700 °С. При таких температурах обеспечивается устойчивое зажигание и последующее горение летучих. Обработка экспериментальных данных показала [152,159–161], что выход топливных концентраций NO_x практически прямо пропорционален содержанию азота в исходном топливе (таблица 2.1.3).

Кроме того на выход SO_x и NO_x влияет содержание влаги (W^a) в образцах, которая способствует сокращению выбросов [152,159–161]. Из анализа таблиц 2.1.2 и 2.1.3, а также представленных зависимостей на рисунке 3.1.1, а следует, что уголь «К» из всех рассмотренных углей содержит наибольшее значение серы (0,868 %) и относительно невысокое значение влаги (2,05 %) (рис. 3.1.1, а). Уголь «Т» содержит меньшее количество серы (0,526 %) и большее количество влаги (2,89 %) (рис. 3.1.1, а). Уголь «Д» имеет большее по сравнению с остальными углями содержание влаги (5,17 %) и невысокое содержание серы (0,398 %),

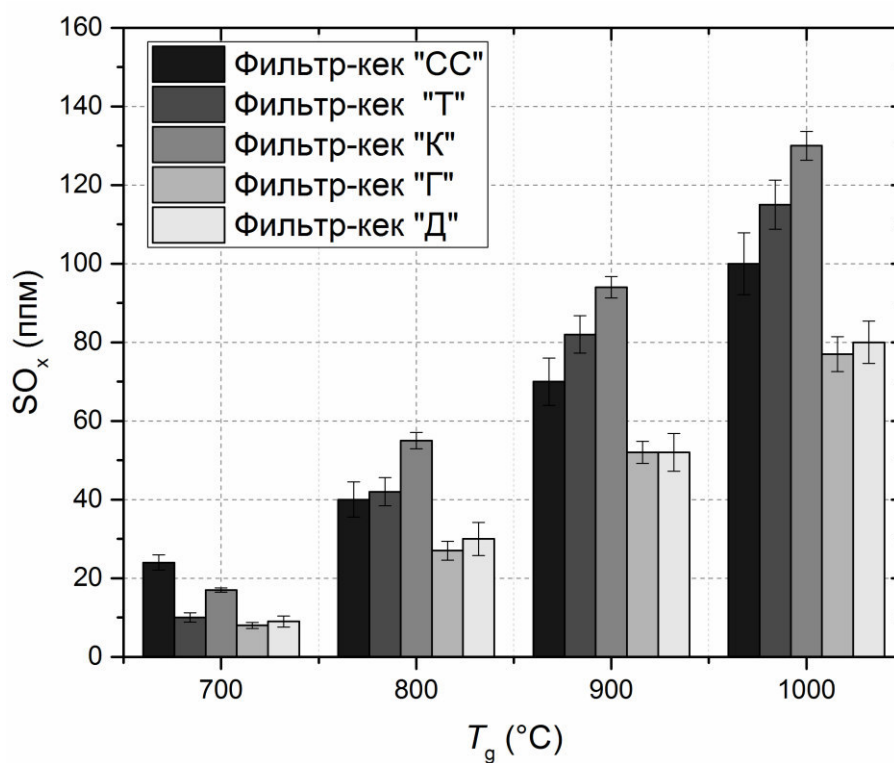
следовательно, наименьшие концентрации выбросов SO_x (рис. 3.1.1, а). Экспериментальные кривые для углей «Г» и «СС» занимают промежуточные положения.

Согласно представленным экспериментальным зависимостям (рис. 3.1.1, б) максимальные концентрации выбросов оксидов азота соответствуют углю «СС», так как он имеет в своем составе приблизительно одинаковое количество азота (2,23 %) и влаги (2,76 %) (таблицы 2.1.2 и 2.1.3). Аналогичные выводы можно сделать и для угля «Г» (азот 2,23 %, влага 2,89 %) (рис. 3.1.1, б). Уголь «Г» содержит наименьшее количество влаги (0,76 %) из всех рассмотренных углей. Однако имеет в составе также малое количество азота (0,01 %) (рис. 3.1.1, б). Наименьшие выбросы NO_x характерны для угля «Д», содержащего большое количество азота (2,62 %), однако высокое содержание в нем влаги (5,17 %) позволяет сократить выбросы NO_x (рис. 3.1.1, б).

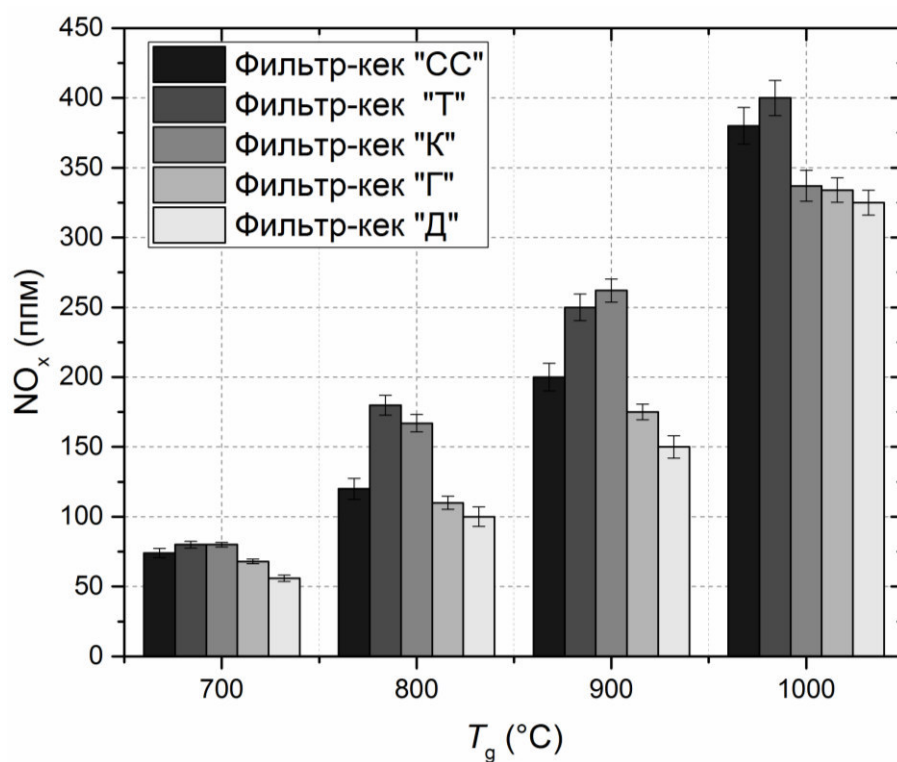
Диапазон значений выбросов оксидов азота при сжигании углей составил 130–550 ппм [61], а оксидов серы – 20–367 ппм [61]. Представленные значения хорошо коррелируют с данными, приведенными в [61,164,165]. Так, например, диапазоны выбросов оксидов азота (NO_x) – 10–200 ппм [61], а оксидов серы (SO_x) – 50–900 ппм [61].

3.1.2. Концентрации NO_x и SO_x при сжигании КЖТ на основе фильтр-кеков каменных углей различных марок

На рисунке 3.1.2 приведены основные результаты выполненных исследований [153,159,161,166], иллюстрирующие концентрации выбросов NO_x и SO_x при сжигании КЖТ на основе фильтр-кеков разных марок каменных углей.



а)



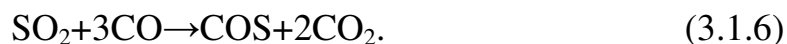
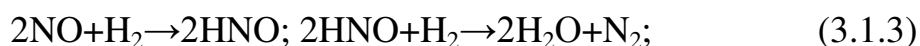
б)

Рисунок 3.1.2. Экспериментальные зависимости концентраций SO_x (а) и NO_x (б) от температуры в камере сгорания при сжигания КЖТ на основе фильтр-кеков каменных углей разных марок [159,161,166]

Замена традиционного подхода пылевидного сжигания угля на применение композиционных жидких топлив способствует снижению концентраций газообразных выбросов [159,161,166], что обуславливается химическими реакциями, протекающими при горении. Вода выступает в качестве несущей среды суспензии. Образующийся при горении перегретый пар вступает во взаимодействие с углеродом, содержащимся в топливе, образуя монооксид углерода и свободный водород [167]:



Водород и монооксид углерода могут выступать в качестве восстановителей, способствуя снижению содержания оксидов азота и серы в дымовых газах [167,168]:



Исходя из вышеописанных химических превращений (3.1.1)–(3.1.6), происходящих при горении топлива, можно сделать заключение о влиянии влажности топливного образца на концентрацию оксидов азота и серы. В частности, чем больше содержание влаги в топливе, тем ниже концентрация выбросов NO_x и SO_x [159,161,166]. Это связано с тем, что в процессе горения образуется большее количество водяных паров (H_2O) и, следовательно, молекул водорода (H_2) и монооксида углерода (CO). Последние, взаимодействуя с SO_x и NO_x , снижают их концентрацию в дымовых газах. Среди ВУТ наибольшая массовая доля влажной составляющей характерна (таблица 2.1.4) для фильтр-кеков марок «Д» (56,8 %) и «Г» (53,1 %), меньшие значения массовой доли влажной составляющей имеют фильтр-кек «К» (43,5 %), фильтр-кек «Т» (39,1 %) и фильтр-кек «СС» (37,9 %).

Следует отметить, что содержание влаги существенно влияет на теплоту сгорания исследованных КЖТ на основе фильтр-кеков (таблицы 2.1.2 и 2.1.4) и, как следствие, определяет энергетические характеристики.

Среди рассмотренных суспензий максимальные значения выбросов SO_x характерны для фильтр-кека «К» (рисунок 3.1.2, а), а минимальные для фильтр-кеков «Г» и «Д» (рисунок 3.1.2, а). Отметим, что значения выбросов SO_x для КЖТ на основе фильтр-кека на 60–80% меньше, чем для углей.

Аналогично углям для исследованных суспензий на основе фильтр-кеков можно отметить следующее. Фильтр-кек «К» имеет высокое содержание азота (2,05 %) и относительно невысокую влажность (43,5 %) (таблицы 2.1.2 и 2.1.3). Следовательно, суспензии на его основе соответствуют высокие концентрации выбросов NO_x (рисунок 3.1.2, б). Фильтр-кек «Г» и фильтр-кек «Д» имеют низкое содержание азота (0,02 %) и высокую влажность (47 % и 56,8 %, соответственно). Следовательно, перечисленные суспензии имеют меньшие выбросы NO_x (рисунок 3.1.2, б).

Следует отметить, что максимальные концентрации выбросов NO_x для КЖТ, приготовленных на основе фильтр-кеков, на 20–50 % меньше, чем для углей [159,161,166]. Для КЖТ (приготовленных из фильтр-кеков) диапазон выбросов оксиды азота составил 55–400 ппм, оксидов серы – 10–130 ппм. Полученные результаты вполне сопоставимы с известными литературными данными [32,63,85], согласно которым концентрации выбросов оксидов азота (NO_x) и диоксида серы (SO_x) составляют следующие диапазоны: при сжигании КЖТ на основе сточных вод 167–207 ппм и 215–285 ппм [32], при сжигании КЖТ на основе каменных углей 310–477 ппм и 130–240 ппм [85], при совместном сжигании КЖТ и нефтяных шламов 80–110 ппм и 45–85 ппм [63], соответственно.

Таким образом, можно обоснованно заключить, что отходы углепереработки представляют перспективные основные компоненты суспензий, которые по экологическим (рисунок 3.1.1) и энергетическим характеристикам (таблицы 2.1.2, 2.1.4) могут заменить традиционное пылеугольное топливо [159,161,166]. При этом планомерная работа по выбору необходимых и

достаточных температур сжигания КЖТ может обеспечить максимальный экологический эффект, т.е. задействовать в теплоэнергетике все виды отходов углепереработки, снизить скорости разведки и разработки новых месторождений угля и нефти, понизить концентрации антропогенных выбросов при сжигании традиционных энергоресурсов.

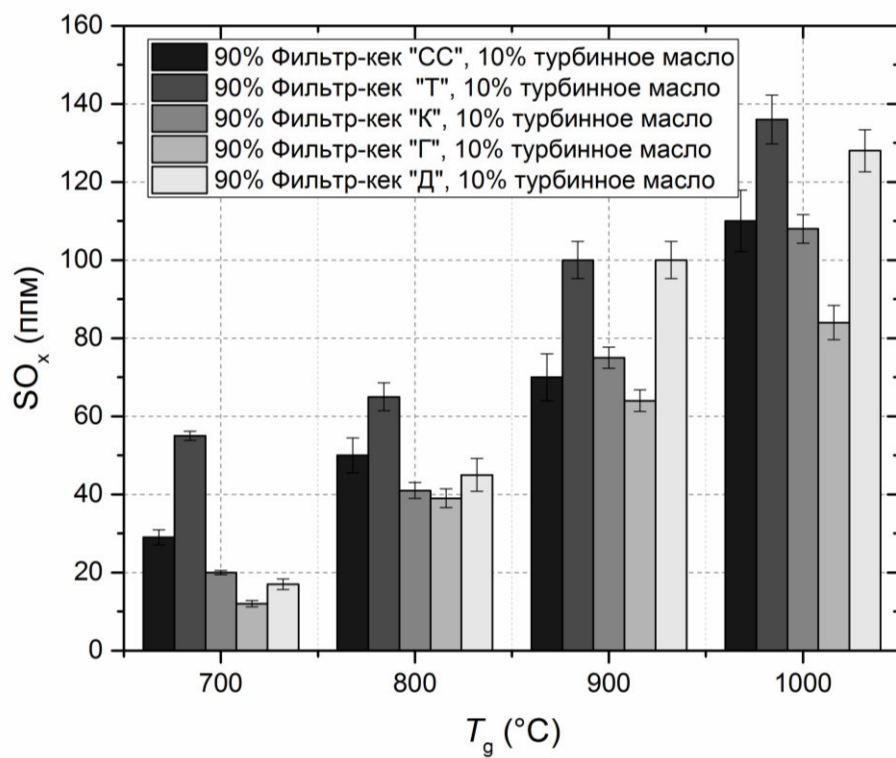
Таким образом, для минимизации концентраций антропогенных выбросов при работе с углями или КЖТ на основе отходов углепереработки необходимо, чтобы топливо характеризовалось [159,161,166]:

- 1) достаточным количеством влаги (для углей 2,5–5 %, для КЖТ 45–55 %);
- 2) высоким содержанием летучих горючих компонентов (30–40 %);
- 3) низкой зольностью (15–18 % для углей, 20–35 % для КЖТ);
- 4) низким содержанием серы и азота (0.2–1.2 %).

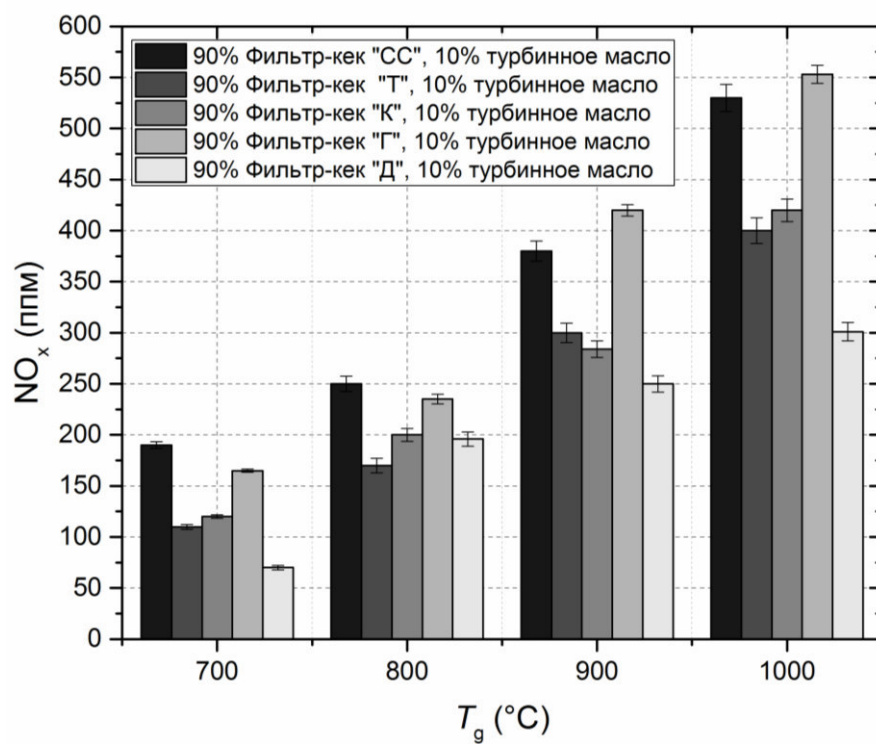
3.1.3. Концентрации NO_x и SO_x при сжигании КЖТ на основе фильтр-кеков разных марок каменных углей и продуктов нефтепереработки

На рисунке 3.1.3 приведены основные результаты выполненных исследований [143,152,160,161,166], иллюстрирующие характерные концентрации SO_x и NO_x при сжигании фильтр-кеков и продуктов нефтепереработки (в частности, отработанного турбинного масла и мазута) в составе КЖТ.

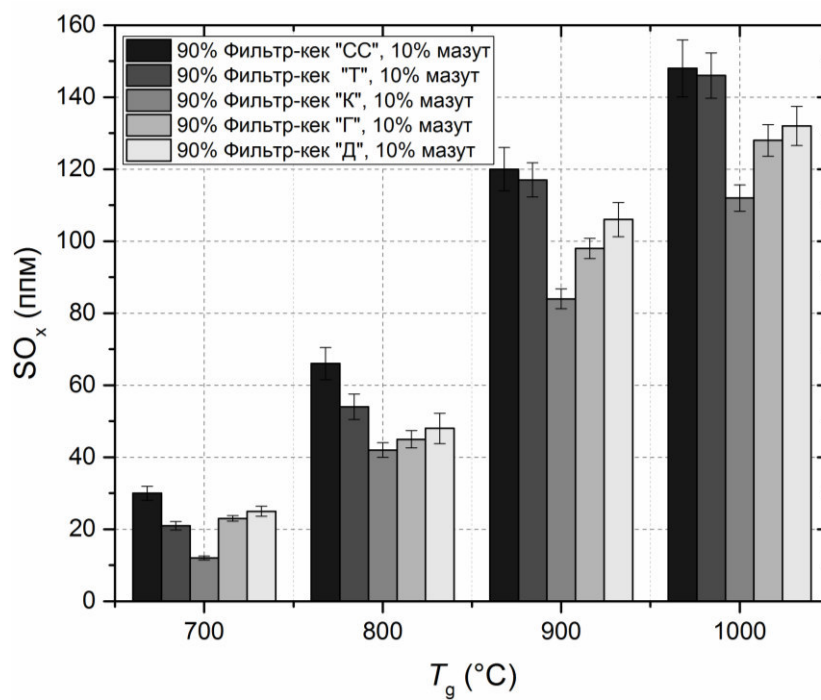
Снижение выбросов NO_x и SO_x в случае сжигания композиционных жидких топлив обусловлено соответствующими химическими реакциями (3.1.1)–(3.1.6) (см. п. 3.1.1), в которых участвует вода.



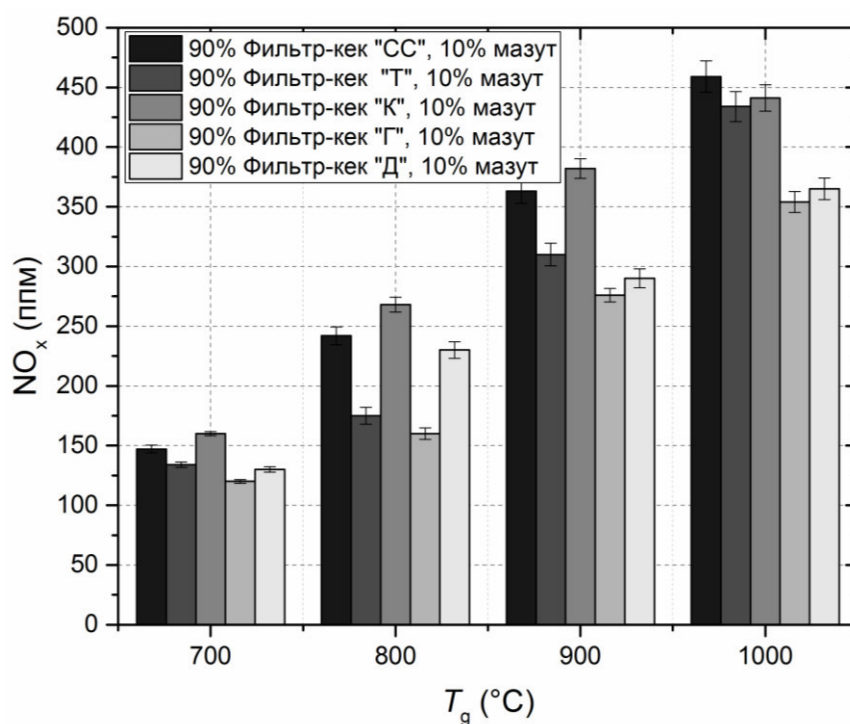
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3.1.3. Экспериментальные зависимости концентраций SO_x (а, в) и NO_x (б, г) от температуры в камере сгорания при сжигании КЖТ на основе фильтр-кеков разных марок с добавлением отработанного турбинного масла и мазута [143,152,160,161,166]

Также благодаря присутствию в КЖТ воды температура и скорость адиабатического сгорания снижается, что приводит к уменьшению образования NO_x [143,152,160,161,166]. Полученные результаты (рисунок 3.1.3) хорошо согласуются с имеющимися представлениями [162,169] о масштабах влияния водной фазы КЖТ на выбросы SO_x и NO_x . Так в среднем диапазон изменения концентраций оксидов серы для суспензий на основе фильтр-кеков разных марок с добавлением продуктов нефтепереработки составил 10–150 ппм (рисунок 3.1.3, а, в), оксидов азота – 70–550 ппм (рисунок 3.1.3, б, г). При сравнении измеренных концентраций выбросов для углей и КЖТ можно сделать вывод о том, что сжигание суспензий способствует снижению концентраций SO_x на 50–60 % [143,160,161,166]. Для выбросов NO_x значительного снижения концентраций не наблюдалось (для некоторых составов снижение достигало 5 %). В целом же можно сказать, что концентрации оксидов азота для углей и КЖТ соизмеримы [143,152,160,161,166]. Если сравнить измеренные значения концентраций для КЖТ, то можно сделать вывод о том, что концентрации NO_x и SO_x для КЖТ на основе фильтр-кеков в два раза меньше, чем для КЖТ на основе фильтр-кеков с добавлением продуктов нефтепереработки [160,161,166].

Подобный факт обусловлен химическим составом, используемых горючих жидкостей. Так содержание серы рабочей части мазутов имеет сравнительно небольшой разброс и чаще всего находится в диапазоне 0,3–3,5 %, у турбинных масел серы в составе не более 1,1 % [160,161,166].

В таблице 3.1.1 представлены концентрации SO_x и NO_x при сжигании типичных и широко используемых жидких горючих отходов [143,152,160,161,166].

Таблица 3.1.1. Максимальные концентрации компонентов продуктов сгорания типичных и широко используемых жидких горючих отходов [152]

Горючая жидкость	Положение зонда газоанализатора в камере сгорания	NO _x , ppm
Мазут	Верхняя точка	18
	Средняя точка	17
	Нижняя точка	17
Масло турбинное индустриальное	Верхняя точка	14
	Средняя точка	14
	Нижняя точка	13
Масло турбинное отработанное	Верхняя точка	18
	Средняя точка	17
	Нижняя точка	17
Масло автомобильное индустриальное	Верхняя точка	16
	Средняя точка	15
	Нижняя точка	15
Масло автомобильное отработанное	Верхняя точка	16
	Средняя точка	21
	Нижняя точка	21
Масло трансформаторное отработанное	Верхняя точка	19
	Средняя точка	17
	Нижняя точка	19

Следует отметить, что полученные диапазоны газообразных выбросов сопоставимы для всех исследуемых образцов [152]. Поэтому с точки зрения экологии возможно использование практически всех рассмотренных жидкостей с равным вкладом для атмосферы окружающей среды. В результате чего выбор той или иной жидкой горючей составляющей для КЖТ обусловлен в большей степени характеристиками процесса горения [36,89,90,170–172]: температурой зажигания, теплотой сгорания, инерционностью зажигания и стабильностью суспензий, а также стоимостью и объемами (запасами) сырья для приготовления КЖТ.

В экспериментах [36,91] показано, что добавление жидких горючих компонентов приводит к снижению температуры зажигания (минимальной необходимой температуры окислителя) на 40–70 °С. Как следствие, можно за счет снижения температуры компенсировать возможный рост концентраций выбросов NO_x и SO_x вследствие добавления жидких горючих компонентов в состав КЖТ. К

тому же, добавление жидкого горючего компонента приведет к небольшому росту температуры в зоне горения. Поэтому при использовании суспензионных топлив возможно потенциальное существенное снижение температуры сжигания с целью повышения экологических показателей работы теплоэнергетических установок.

Следует отметить, что в случае КЖТ на основе фильтр-кеков с добавлением продуктов нефтепереработки разброс экспериментальных точек в одной серии экспериментов при идентичных условиях значительно шире, чем для опытов с КЖТ на основе кеков. Как следствие, аппроксимационные значения на рисунке 3.1.3 не всегда отражают монотонный рост или снижение соответствующих концентраций. Скорее всего, это обусловлено тем, что жидкий горючий компонент неравномерно прогревается, испаряется и горит в составе КЖТ [36,91]. Тем не менее, общая тенденция (в проведенных опытах с применением мазута и отработанного турбинного масла) роста концентраций выбросов даже при небольшом добавлении отработанных жидких горючих компонентов прослеживалась во всех опытах [143,152,160,161,166].

3.2. Критериальное обоснование выбора оптимального состава КЖТ

В таблице 3.2.1 приведены приоритеты по инерционности процессов зажигания капель КЖТ разного компонентного состава при идентичных температуре (1000 К) и скорости движения (5 м/с) потока окислителя.

Таблица 3.2.1. Основные характеристики компонентов КЖТ [135]

Компонент КЖТ	Вид	Критерии выбора		
		Стоимость (S_i), руб/кг	Теплота сгорания (Q_i), МДж/кг	Диапазон изменения относительной массовой концентрации в топливной композиции (γ_i), %
Твердое горючее	Угли бурые	0,6-1,1	26-32	40-60
	Угли каменные	0,7-2,9	32-37	
	Антрацит	50	34-36	
	Фильтр-кеки каменных углей	0,2-0,5	33-34	
	Углеродный остаток от пиролиза автомобильных шин	80	29-34	
Жидкое горючее	Нефть	23-29	41-43	0-20
	Ацетон	76-78	29-32	
	Этиловый спирт	203-254	30-31	
	Керосин	61-85	35-46	
	Бензин	51-63	46-47	
	Мазут	11-27	39-41	
	Дизельное топливо	35-41	44-46	
	Отработанное моторное масло	6-9	36-45	
	Отработанное трансформаторное масло	9-17	41-43	
	Отработанное турбинное масло	9-17	41-44	
	Отработанное касторовое масло		36-37	
	Компрессорное масло		45-46	
	Горючая смесь для энергетических целей		37-39	
	Водонефтяная эмульсия		44-46	
	Нефтяные шламы	17	13-21	
	Нефтяные отложения	0,7	41-43	
	Фусы	0,4	32-48	
	Полимеры после регенерации поглотительного масла	15	30-40	
	Каменноугольная смола	12	36-41	
Негорючая жидкость	Технологические или сточные воды	–	–	40-50
Пластификатор	ЩКПК (щелочной концентрат (сток) производства капролактама)	9	–	0,5-1
	Гумат натрия	45	–	
	Карбоксиметилцеллюлоза	1	–	
	Смачиватель «Неолас»	65-120	–	

Как и следовало ожидать, минимальную инерционность можно обеспечить при использовании углей малой степени метаморфизма с максимальным выходом летучих (в частности, бурых). Фильтр-кеки характеризовались максимальной инерционностью инициирования горения [89,91,136,142]. Поэтому КЖТ на их основе имели низкий приоритет по данному показателю.

При сравнении КЖТ с идентичным твердым горючим компонентом, но варьируемыми горючими жидкостями установлено, что минимальные времена задержки зажигания соответствуют КЖТ с жидкостями, у которых наименьшие температуры воспламенения и теплота парообразования (например, среди исследованных отработанных масел минимальные значения этого параметра соответствуют моторному машинному) [36,89,91]. Выполненные эксперименты показали, что на инерционность зажигания КЖТ определяющим образом влияют и параметры фазовых превращений жидких горючей и негорючей компонент, и термического разложения органической части угля [36,89,91,136,142]. Для составов, у компонентов которых эти параметры имеют минимальные значения из рассмотренных диапазонов, характерны наименьшие инерционности зажигания.

Длительность процесса горения КЖТ определяется главным образом параметрами коксового остатка (т.е. характеристиками твердой угольной компоненты). Проведенные эксперименты [36,89,91,136] показали, что эти длительности максимальны для КЖТ на основе каменных углей (при этом температура горения максимальна). Несколько меньшие значения характерны углеродному остатку пиролиза автомобильных шин и фильтр-кекам. Минимальные же значения соответствуют КЖТ с бурыми углями. Жидкие горючие компоненты оказывали незначительное влияние на длительность горения КЖТ (роль этих составляющих ограничивалась лишь стадией зажигания за счет газофазного реагирования паров и продуктов термического разложения с окислителем) [89]. Как следствие, приоритетность КЖТ по данному критерию зависела от используемого твердого угольного компонента.

Относительные концентрации компонентов КЖТ в составе суспензии, представленные в таблице 3.2.2, соответствуют максимальному удельному коэффициенту «теплота сгорания/стоимость» (МДж/руб.).

Таблица 3.2.2. Результаты технико-экономического обоснования с выделенными приоритетами [135]

Содержание компонента в КЖТ	Наименование компонента в КЖТ	Стоимость КЖТ, руб/кг	Теплота сгорания КЖТ, МДж/кг	Удельный показатель «теплота сгорания/стоимость КЖТ», МДж/руб	Приоритет по соотношению «теплота сгорания /стоимость КЖТ», МДж/руб	Приоритет по показателю «максимальная длительность горения КЖТ», с	Приоритет по показателю «минимальное время задержки зажигания КЖТ», с
49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	0,2	20,9	83,9	1	14	8
10,0%	Фусы						
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	0,3	21,1	75,7	2	13	7
10,0%	Нефтяные отложения						
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
15,0%	Фусы	0,4	22,9	52,2	3	5	14
44,5%	Угли бурые						
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
15,0%	Нефтяные отложения	0,5	23,3	47,9	4	4	13
44,5%	Угли бурые						
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
15,0%	Фусы	0,8	21,6	27,9	5	9	2
44,5%	Угли каменные						

Продолжение таблицы 3.2.2

[illegible]

Продолжение таблицы 3.2.2

Содержание компонента в КЖТ	Наименование компонента в КЖТ	Стоимость КЖТ, руб/кг	Теплота сгорания КЖТ, МДж/кг	Удельный показатель «теплота сгорания/стоимость КЖТ», МДж/руб	Приоритет по соотношению «теплота сгорания/стоимость КЖТ», МДж/руб	Приоритет по показателю «максимальная длительность горения КЖТ», с	Приоритет по показателю «минимальное время задержки зажигания КЖТ», с
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
49,5%	Угли бурые						
10,0%	Каменноугольная смола	1,6	22,6	13,9	10	6	15
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды						
49,5%	Фильтр-кеки каменных углей	1,6	21,1	13,6	11	12	6
10,0%	Отработанное трансформаторное масло						
0,5%	ЩКПК						
40,0%	Технологические или сточные воды	1,6	21,5	13,5	12	7	1
49,5%	Угли каменные						
10,0%	Отработанное моторное масло						
0,5%	ЩКПК	1,6	20,9	13,3	13	11	5
40,0%	Технологические или сточные воды						
49,5%	Фильтр-кеки каменных углей						
10,0%	Отработанное турбинное						

Продолжение таблицы 3.2.2

[illegible]

В случае повышения концентрации жидкой горючей компоненты можно изменить приоритетность КЖТ как по длительности горения, так и инерционности зажигания. В частности, проведенные эксперименты [89–91,136,142] показали, что при теплоте парообразования жидкой горючей составляющей (например, масел) меньше, чем тепловой эффект термического разложения органической части твердого горючего компонента повышение концентрации масел может приводить к ускорению процесса зажигания, но при этом и температура и длительность горения состава КЖТ будут снижаться. Поэтому за счет варьирования концентраций компонентов суспензий относительно приведенных в таблице 3.2.2 можно изменить приоритетность составов КЖТ как в сторону больших длительностей, так и минимальных времен задержки зажигания. Представленные в таблице 3.2.2 составы характеризуются близкими показателями вязкости (существенно влияет на транспортируемость и стабильность). Поэтому при изменении концентраций нужно учитывать требования систем сжигания к текучести КЖТ и гомогенности (стабильности) на стадии распыла в топочные устройства энергетических установок.

Несмотря на варьирование компонентов и их концентраций в составе КЖТ, во всех проведенных экспериментах [36,89–91,136,169] установлен единый механизм инициирования устойчивого горения исследованных суспензионных композиций. Этот фактор позволяет сделать заключение о возможности применения единой технологии, а также соответствующих технологических блоков распыла и нагрева при сжигании исследованных КЖТ на практике. Последовательность процессов при сжигании одиночной капли следующая [91]: 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. Для группы капель (в отличие от

одиночной) вследствие разной инерционности их прогрева в потоке могут наблюдаться пересечения в соответствующих стадиях с соседними каплями. В зависимости от требуемого приоритета (таблица 3.2.2) можно изменить компонентный состав и, соответственно, длительности выделенных стадий процесса горения.

Проведенные по методикам [147,148] эксперименты позволили сделать вывод о том, что устойчивое зажигание исследованных КЖТ возможно при варьировании температуры окислителя в широком диапазоне (в частности, от «низких» (327–377 °С) температур [166,169] до соответствующих типичным топочным устройствам – не менее 727 °С). Техничко-экономический анализ показал, что в случае высоких (более 727 °С) температур приоритетность соответствует таблице 3.2.2. При «низких» (или умеренных) температурах окислителя [136,142] процессы зажигания КЖТ на основе некоторых угольных компонентов (например, фильтр-кеков) реализуются с высокой инерционностью и малыми температурами горения. Как следствие, при таких условиях оптимизация процессов использования КЖТ может довольно существенно измениться относительно приоритетности, приведенной в таблице 3.2.2. В этом случае целесообразно предложенную методику дополнить весовыми коэффициентами для учета требуемого вклада соответствующего приоритета или критерия (в зависимости от целей соответствующих технологий применения КЖТ и производств).

В случае дополнения выделенных в таблице 3.2.2 критериев объемами (запасами) компонентов можно для соответствующих производств, районов, регионов, городов и даже стран установить уникальные (идентифицирующие) приоритетные перечни компонентов суспензий и их концентрации для достижения оптимальных (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) характеристик процессов сжигания топлив. Например, для Кузбасса характерны чрезвычайно большие объемы фильтр-кеков (после переработки углей для экспорта) и отработанных масел (вследствие развитого транспортного сектора). В этом случае приоритетность запасов даже может

превышать аналогичный показатель, характеризующий худшую (по сравнению с углями каменными и бурыми) инерционность зажигания топливных композиций. Красноярский край имеет большие запасы бурых углей, которые характеризуются минимальной инерционностью зажигания, но и меньшими температурами и теплотой сгорания. Поэтому приоритетность запасов может иметь большее значение, чем соответствующий показатель по эффективному параметру «теплота сгорания/стоимость». Для центральных регионов России с достаточно сильно развитой транспортной промышленностью высоки объемы ежегодного производства отработанных масел и других нефтепродуктов, но минимальны запасы угольных компонентов. Поэтому актуальна задача производства углеродного остатка (твердого горючего компонента КЖТ), например, при довольно экономичном низкотемпературном пиролизе автомобильных шин.

Полученные по результатам технико-экономического анализа приоритетные группы [135] компонентов КЖТ развивают представления [140]. В частности, в [140] выделены приоритетные угольные компоненты КЖТ. При этом критериями выбора [140] являлись: расходы на приготовление суспензионных топливных композиций, зольность, сложность транспортировки, переоборудование действующих энергетических агрегатов и производств в целом. Рассмотрены [140] особенности перспектив применения КЖТ в России, Китае, Японии, Италии, США и Финляндии в соответствии с исследованными приоритетами. Применение выделенных в настоящей работе приоритетных критериев по стоимости, теплоте сгорания и инерционности зажигания, а также полученные группы КЖТ (с соответствующими концентрациями компонентов) можно использовать при выборе суспензионных композиций в разных регионах в соответствии с экономическими и экологическими требованиями.

3.3. Результаты технико-экономического обоснования перехода на перспективные суспензии

3.3.1. Затраты на приобретение отдельных компонентов КЖТ

В таблицах 3.3.1–3.3.3 приведено сравнение фактических и предполагаемых расходов топлива и его стоимости с учетом обеспечения бесперебойной работы рассматриваемых станций в период 2012–2014 гг. Расчет проведен для этого периода времени, так как все данные для расчета известны на эти три года. Очевидно, что возможно пересчитать данные табл. 3.3.1–3.3.3 на любой другой диапазон времени при известной информации о фактических расходах топлива на соответствующих станциях и котельных. Методика расчета не изменится. Установлена величина положительного денежного потока (экономии) при переходе на различные суспензии трех станций.

Таблица 3.3.1. Сравнение расходов топлива и его стоимости для станции № 1 [143,144]

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Фактические данные				
Расход угля	т/год	447460	405879,7	435305,3
Расход газа	тыс. м ³ /год	335727	286737	413679,3
Топливные затраты	млн. руб./год	1954,5	1700,5	2255,6
Состав КЖТ № 1 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 1, в том числе:	т/год	1016119,3	894608,9	1163546,9
фильтр-кеки	т/год	502979	442831,4	575955,7
Фусы	т/год	101611,9	89460,9	116354,7
ЩКПК	т/год	5080,6	4473	5817,7
техническая вода	т/год	406447,7	357843,6	465418,8
Топливные затраты	млн. руб./год	253,1	222,8	289,8
Экономия	млн. руб./год	1701,4	1477,7	1965,8
Состав КЖТ № 2 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 2, в том числе:	т/год	1005540,7	885295,4	1151433,5
фильтр-кеки	т/год	497742,6	438221,2	569959,6
нефтяные отложения	т/год	100554,1	88529,5	115143,4
ЩКПК	т/год	5027,7	4426,5	5757,2
техническая вода	т/год	402216,3	354118,1	460573,4

Продолжение таблицы 3.3.1

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Топливные затраты	млн. руб./год	280,6	247,1	321,4
Экономия	млн. руб./год	1673,9	1453,4	1934,2
Состав КЖТ № 3 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 3, в том числе:	т/год	984300,8	866595,4	1127112
Фусы	т/год	147645,1	129989,3	169066,8
каменный уголь	т/год	438013,9	385635	501564,8
ЦКПК	т/год	4921,5	4333	5635,6
техническая вода	т/год	393720,3	346638,2	450844,8
Топливные затраты	млн. руб./год	761,2	670,1	871,6
Экономия	млн. руб./год	1193,3	1030,4	1384,0
Состав КЖТ № 4 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 4, в том числе:	т/год	1006970,3	886554	1153070,5
фильтр-кеки	т/год	498450,3	438844,2	570769,9
моторное масло	т/год	100697	88655,4	115307
ЦКПК	т/год	5034,9	4432,8	5765,4
техническая вода	т/год	402788,1	354621,6	461228,2
Топливные затраты	млн. руб./год	1025,4	902,8	1174,2
Экономия	млн. руб./год	929,1	797,7	1081,4

Таблица 3.3.2. Сравнение расходов топлива и его стоимости для станции № 2 [143,144]

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Фактические данные				
Расход мазута	т/год	10000	10000	10000
Расход газа	тыс. м ³ /год	336700	344100	402400
Топливные затраты	млн. руб./год	1479,1	1509,3	1746,4
Состав КЖТ № 1 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 1, в том числе:	т/год	561700	574100	671400
фильтр-кеки	т/год	278100	284200	332300
Фусы	т/год	56200	57400	67100
ЦКПК	т/год	2800	2,900	3400
техническая вода	т/год	224700	229700	268600
Топливные затраты	млн. руб./год	139,9	143,0	167,2
Экономия	млн. руб./год	1339,1	1366,2	1579,2
Состав КЖТ № 2 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 2, в том числе:	т/год	555900	568100	664400
фильтр-кеки	т/год	275200	281200	328900
нефтяные отложения	т/год	55600	56800	66400

Продолжение таблицы 3.3.2

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
ИЦКПК	т/год	2800	2800	3300
техническая вода	т/год	222400	227300	265800
Топливные затраты	млн. руб./год	155,2	158,6	185,4
Экономия	млн. руб./год	1323,9	1350,7	1561,0
Состав КЖТ № 3 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 3, в том числе:	т/год	544200	556200	650400
Фусы	т/год	81600	83400	97600
каменный уголь	т/год	242200	247500	289400
ИЦКПК	т/год	2700	2800	3300
техническая вода	т/год	217700	222500	260200
Топливные затраты	млн. руб./год	420,8	430,1	502,9
Экономия	млн. руб./год	1058,3	1079,2	1243,5
Состав КЖТ № 4 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 4, в том числе:	т/год	556700	569000	665400
фильтр-кеки	т/год	275600	281600	329400
моторное масло	т/год	55700	56900	66500
ИЦКПК	т/год	2800	2800	3300
техническая вода	т/год	222700	227600	266100
Топливные затраты	млн. руб./год	566,9	579,4	677,5
Экономия	млн. руб./год	912,2	929,9	1068,9

Таблица 3.3.3. Сравнение расходов топлива и его стоимости для станции № 3 (котельной) [143,144]

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Фактические данные				
Расход угля	т/год	956,5	1060	1016
Топливные затраты	млн. руб./год	1,3	1,4	1,3
Состав КЖТ № 1 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 1, в том числе:	т/год	974,2	1079	1035
фильтр-кеки	т/год	482,2	534,5	512,4
Фусы	т/год	97,4	108	103,5
ИЦКПК	т/год	4,9	5,4	5,2
техническая вода	т/год	389,7	431,9	414,1
Топливные затраты	млн. руб./год	0,2	0,3	0,3
Экономия	млн. руб./год	1	1,1	1,1
Состав КЖТ № 2 (по табл. 3.2.2)				
Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Расход КЖТ № 2, в том числе:	т/год	964,1	1068	1024
фильтр-кеки	т/год	477,2	528,9	507,1

Продолжение таблицы 3.3.3

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
нефтяные отложения	т/год	96,4	106,8	102,4
ЩКПК	т/год	4,8	5,3	5,1
техническая вода	т/год	385,6	427,4	409,8
Топливные затраты	млн. руб./год	0,3	0,3	0,3
Экономия	млн. руб./год	1	1	1
Состав КЖТ № 3 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 3, в том числе:	т/год	943,7	1046	1003
Фусы	т/год	141,6	156,9	150,4
каменный уголь	т/год	420	465,4	446,2
ЩКПК	т/год	4,7	5,2	5,0
техническая вода	т/год	377,5	418,4	401,1
Топливные затраты	млн. руб./год	0,7	0,8	0,8
Экономия	млн. руб./год	0,5	0,6	0,6
Состав КЖТ № 4 (по табл. 3.2.2)				
Расход КЖТ № 4, в том числе:	т/год	965,5	1070	1026
фильтр-кеки	т/год	477,9	529,6	507,8
моторное масло	т/год	96,5	107	102,6
ЩКПК	т/год	4,8	5,3	5,1
техническая вода	т/год	386,2	428	410,3
Топливные затраты	млн. руб./год	1	1,1	1
Экономия	млн. руб./год	0,3	0,3	0,3

Наибольшая экономия наблюдается при переходе на сжигание КЖТ № 1 (таблицы 3.3.1–3.3.3), т.к. этот состав имеет наибольший приоритет [135] по соотношению теплоты сгорания топлива к стоимости входящих в него компонентов (таблица 3.2.2).

3.3.2. Эксплуатационные затраты

В качестве данной статьи затрат рассматривались текущие расходы станций, связанные с приготовлением КЖТ, в частности, затраты на потребляемую электроэнергию.

В настоящее время потребности трех исследованных станций в электроэнергии на собственные нужды покрываются за внешней сети по цене 927,54 руб./тыс. кВт·ч [146]. Данные о расходе электрической энергии и

соответствующих затратах на приготовление угольной пыли приведены в таблице 3.3.4.

Таблица 3.3.4. Расход электрической энергии и затраты на пылеприготовление [143,144]

Параметр	Размерность	2014	2013	2012
Станция № 1				
Фактический расход эл/эн на пылеприготовление	кВт*ч/год	17271956	15666956	16802785
Фактические затраты на эл/эн на пылеприготовление	млн. руб./год	16	14,5	15,6
Станция № 2				
Фактический расход эл/эн на пылеприготовление	кВт*ч/год	12996195,4	13282646	15533257,6
Фактические затраты на эл/эн на пылеприготовление	млн. руб./год	12,1	12,3	14,4
Станция № 3				
Фактический расход эл/эн на пылеприготовление	кВт*ч/год	36919	40916	39229,2
Фактические затраты на эл/эн на пылеприготовление	млн. руб./год	0,03	0,04	0,04

Результаты расчетов годового потребления электроэнергии и соответствующих эксплуатационных затрат на приготовление КЖТ представлены в таблице 3.3.5. Отрицательные значения иллюстрируют экономию денежных средств за счет снижения затрат на электроэнергию.

Таблица 3.3.5. Эксплуатационные затраты на приготовление КЖТ гомогенизатором [143,144]

Параметр	Размерность	Станция № 1			Станция № 2			Станция № 3		
		2014	2013	2012	2014	2013	2012	2014	2013	2012
Расход эл/эн на приготовление КЖТ № 1	кВт*ч/год	4750924	4182795	5440230	2626470	2684360	3139198	4555	5048	4840
Затраты на эл/эн для КЖТ № 1	млн. руб. /год	4,4	3,9	5,1	2,4	2,5	2,9	0,004	0,005	0,004
Разница затрат на эл/эн на приготовление КЖТ № 1 и фактических затрат на пылеприготовление	млн. руб./год	-11,6	-10,7	-10,5	-9,6	-9,8	-11,5	-0,03	-0,03	-0,03
Расход эл/эн на приготовление КЖТ № 2	кВт*ч/год	4701463	4139249	5383593	2599126	2656414	3106516	4508	4996	4790
Затраты на эл/эн для КЖТ № 2	млн. руб. /год	4,4	3,8	5	2,4	2,5	2,9	0,004	0,005	0,004
Разница затрат на эл/эн на приготовление КЖТ № 2 и фактических затрат на пылеприготовление	млн. руб./год	-11,7	-10,7	-10,6	-9,6	-9,9	-11,5	-0,03	-0,03	-0,03
Расход эл/эн на приготовление КЖТ № 3	кВт*ч/год	4602155	4051816	5269876	2544225	2600303	3040898	4412	4890	4689

Продолжение таблицы 3.3.5

Параметр	Размерность	Станция № 1			Станция № 2			Станция № 3		
		2014	2013	2012	2014	2013	2012	2014	2013	2012
Затраты на эл/эн для КЖТ № 3	млн. руб. /год	4,3	3,8	4,9	2,4	2,4	2,8	0,004	0,005	0,004
Разница затрат на эл/эн на приготовление КЖТ № 3 и фактических затрат на пылеприготовление	млн. руб./год	-11,8	-10,8	-10,7	-9,7	-9,9	-11,6	-0,03	-0,033	-0,032
Расход эл/эн на приготовление КЖТ № 4	кВт*ч/год	4708147	4145134	5391247	2602821	2660190	3110933	4514	5003	4797
Затраты на эл/эн для КЖТ № 4	млн. руб. /год	4,4	3,9	5	2,4	2,5	2,9	0,004	0,005	0,004
Разница затрат на эл/эн на приготовление КЖТ № 4 и фактических затрат на пылеприготовление	млн. руб./год	-11,7	-10,7	-10,6	-9,6	-9,9	-11,5	-0,03	-0,033	-0,032

Примечание: снижение затрат относительно фактических показано со знаком «—».

3.3.3. Капитальные затраты

1) Изменения в технологических схемах топливных хозяйств ТЭС

Топливное хозяйство ТЭС [173] представляет комплекс технологически связанных устройств и сооружений для приема, хранения, подготовки топлива и его транспортировки внутри электростанции. Согласно исходным данным (таблица 2.3.1) [146] на станции № 1 топливное хозяйство реализовано для каменного угля, природного газа и мазута, на станции № 2 – для природного газа и мазута, на станции № 3 – для каменного угля. В данной работе рассмотрены технологические схемы топливных хозяйств для каждого вида топлива (твердого, жидкого и газового). Далее выполнены преобразования существующих схем для использования КЖТ на рассмотренных станциях.

2) Топливное хозяйство ТЭС на твердом топливе (угле)

Принципиальная схема топливного хозяйства ТЭС на твердом топливе показана на рисунке 3.3.1.

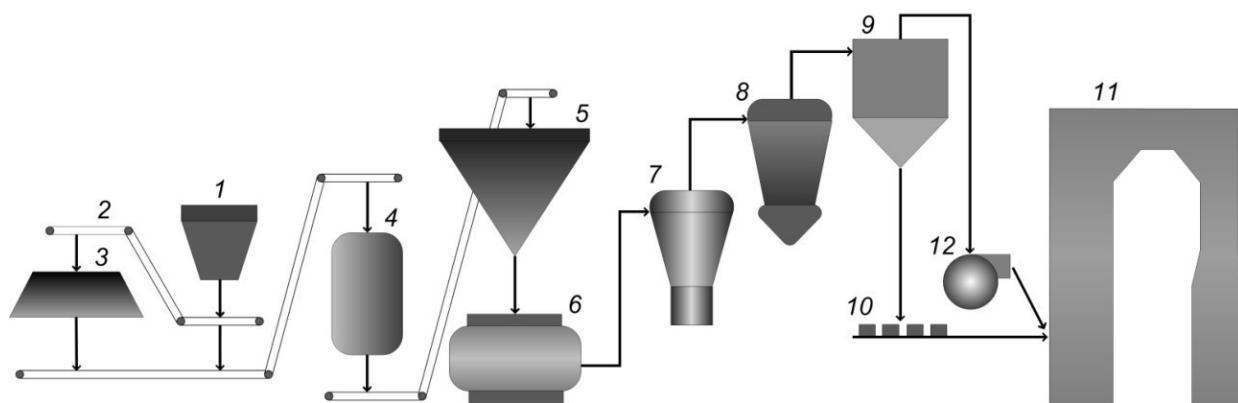


Рисунок 3.3.1. Технологическая схема угольного хозяйства ТЭС: 1 – приемный бункер; 2 – ленточный транспортер; 3 – склад угля; 4 – дробильная установка; 5 – бункер сырого угля; 6 – пылеугольная мельница; 7 – сепаратор; 8 – циклон; 9 – бункер угольной пыли; 10 – питатель угля; 11 – паровой котел; 12 – мельничный вентилятор [174]

Топливо в железнодорожных вагонах поступает к разгрузочным устройствам, откуда с помощью ленточных транспортеров направляется на склад.

Со склада топливо подается в дробильную установку. Имеется возможность подавать топливо в дробильную установку и непосредственно от разгрузочных устройств. Из дробильной установки топливо поступает в бункера сырого угля, а оттуда – в пылеугольные мельницы. Угольная пыль пневматически транспортируется через сепаратор и циклон в бункер угольной пыли, а оттуда питателями к горелкам котла. Воздух из циклона засасывается мельничным вентилятором и подается в топочную камеру котла.

3) Топливное хозяйство ТЭС на жидком топливе (мазуте)

Для приемки, хранения, подачи необходимого количества мазута в котельную и подготовки его для сжигания в топках котлов, предусмотрен комплекс устройств – мазутное хозяйство (рисунок 3.3.2). Из приемного сливного устройства (включающего в себя железнодорожные цистерны, эстакаду, переносной сливной лоток, сливной желоб и отводящую трубу) мазут поступает в приемную емкость. Из нее мазут подается в фильтр грубой очистки и насосами через фильтры тонкой очистки закачивается в емкость мазутохранилища. Из емкости мазутохранилища через фильтры тонкой очистки и подогреватели погружными нефтяными насосами мазут подается в горелки котельного агрегата. Часть разогретого мазута направляется по линии рециркуляции в мазутохранилище для разогрева находящегося там мазута. Рециркуляция мазута предназначена для предупреждения застывания мазута в трубопроводах при уменьшении или прекращении его потребления.

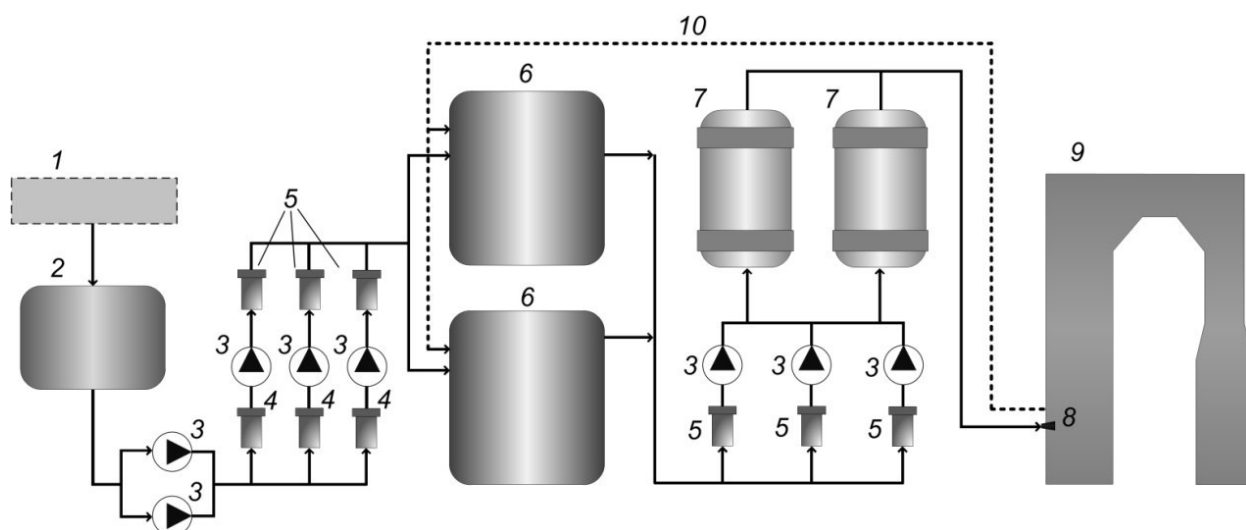


Рисунок 3.3.2. Технологическая схема мазутного хозяйства (с наземным мазутохранилищем) ТЭС: 1 – приемное устройство; 2 – приемная емкость; 3 – насос; 4 – фильтр грубой очистки; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – мазутохранилище; 7 – подогреватель; 8 – форсунка; 9 – паровой котел; 10 – линия рециркуляции [174]

4) *Топливное хозяйство ТЭС на газовом топливе (природном газе)*

Топливное хозяйство электростанций, работающих на газовом топливе, является наиболее простым (в сравнении с углем и мазутом). Однако при сооружении таких электростанций, как правило, предусматривается возможность их работы не только на газе, но и на мазуте. Схема газового хозяйства электростанции показана на рисунке 3.3.3. На территории электростанции не предусмотрены газохранилища. Газ поступает на электростанцию от магистрального газопровода или от газораспределительной станции (ГРС). Для снижения давления до необходимого (по условиям работы горелок котлов) устанавливается газораспределительный пункт (ГРП). Обычно ГРП размещается в отдельном здании на территории электростанции и оборудуется предохранительными противопожарными и противовзрывными устройствами. Производительность ГРП рассчитывается на максимальный расход газа всеми котлами электростанции. В каждом ГРП предусматривается одна резервная

установка для регулирования давления газа. Все газопроводы к ГРП и до паровых котлов прокладываются над землей и не резервируются.

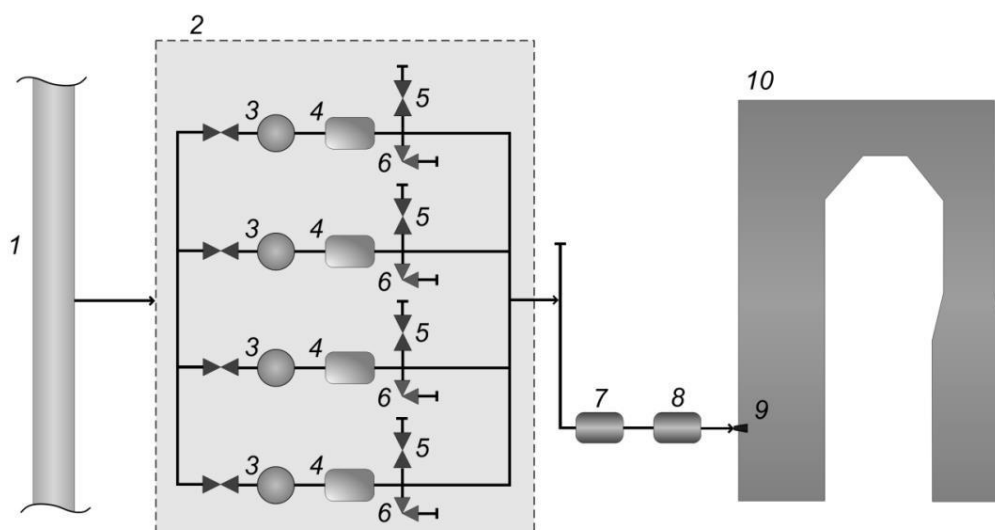


Рисунок 3.3.3. Технологическая схема газового хозяйства ТЭС: 1 – магистральный газопровод; 2 – газораспределительный пункт; 3 – фильтр; 4 – регулятор давления; 5 – свеча для продувки газопровода; 6 – предохранительный клапан; 7 – отсечной клапан; 8 – регулирующий клапан; 9 – горелка; 10 – паровой котел [144,174]

5) Технологические изменения в схемах топливных хозяйств ТЭС при переходе на КЖТ

Применение КЖТ существенно упрощает систему топливного хозяйства (рисунок 3.3.4). В частности, на станции № 1 исключается необходимость в оборудовании, предназначенном для хранения, измельчения и транспортировки угля, а также в оборудовании мазутного и газового хозяйств. Исключением являются резервуары для хранения мазута. В данных емкостях будут храниться компоненты КЖТ (фильтр-кек, отработанная горючая жидкость и, при необходимости, дополнительный горючий компонент (например, мел, солома, углеродный остаток пиролиза автомобильных покрышек и др.) [120,121].

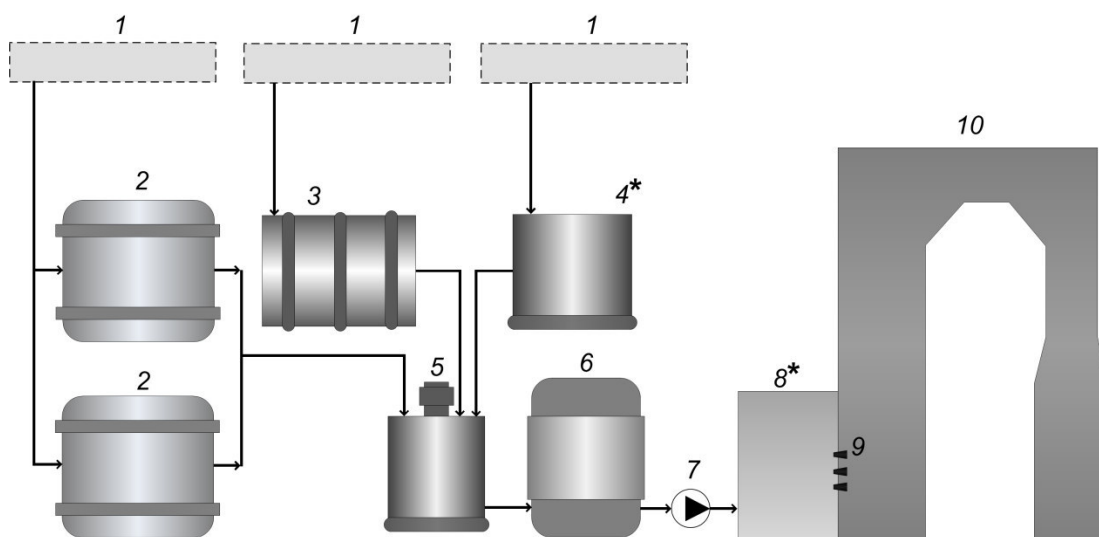


Рисунок 3.3.4. Технологическая схема топливного хозяйства ТЭС, работающей на КЖТ: 1 – приемное устройство; 2 – резервуар для хранения фильтр-кека; 3 – резервуар для хранения отработанной горючей жидкости; 4* – резервуар для хранения дополнительного компонента; 5 – емкость с гомогенизатором; 6 – накопительная емкость готового КЖТ; 7 – насос; 8* – предтопок; 9 – форсунка; 10 – паровой котел [144,174]

** по требованию заказчика (возможна реализация системы без резервуара для хранения дополнительного компонента и предтопка)*

б) Затраты на систему топливного хозяйства

В таблицах 3.3.6–3.3.8 представлены затраты на системы топливных хозяйств каждой из рассматриваемых станций.

Таблица 3.3.6. Сравнение расходов на оборудование системы топливного хозяйства станции № 1 [144,174]

Узел	Количество	Цена/шт., тыс. руб.	Сумма, тыс. руб.
Топливное хозяйство ТЭС на твердом топливе			
Разгрузочное устройство	1	44000	44000
Склад	1	2000	2000
Ленточный транспортер	1	2000	2000
Дробильная установка	1	1000	1000
Пылеугольная мельница	20	30000	600000
Бункер сырого угля	20	2000	40000
Сепаратор	20	400	8000

Продолжение таблицы 3.3.6

Узел	Количество	Цена/шт., тыс. руб.	Сумма, тыс. руб.
Циклон	20	200	4000
Бункер угольной пыли	20	1500	30000
Питатель пыли	60	1500	90000
Взрывной предохранительный клапан	160	20	3200
Дымосос инертных газов	20	100	2000
Мельничный вентилятор	20	200	4000
Топливное хозяйство ТЭС на жидком топливе			
Приемное устройство	1	1000	1000
Мазутохранилище	2	2400	4800
Фильтр (грубой и тонкой очистки)	9	110	990
Насос	6	37	222
Подогреватель	2	220	440
Форсунка	60	40	2400
Топливное хозяйство ТЭС на газовом топливе			
Конденсатоотвод	1	45	45
Расходомер	1	75	75
Фильтр	4	25	100
Регулятор давления	4	60	240
Клапан предохранительный	4	130	520
Клапан отсечной	10	25	250
Клапан регулирующий	10	45	450
Свеча для продувки газопровода	1	1	1
Итого			841733
Топливное хозяйство ТЭС на КЖТ			
Резервуар для хранения фильтр-кека	3	2800	8400
Резервуар для хранения отработанной горючей жидкости	1	—	—
Резервуар для хранения дополнительного горючего компонента *	1	—	—
Резервуар с гомогенизатором (основной, резервный)	20	3000	30000
Накопительная емкость готового КЖТ	10	3800	38000
Предтопок *	10	1500	15000
Устройство подачи топлива (форсунки, насос, трубопровод)	10	3500	35000
Итого			161200
Экономия при переходе на КЖТ			680533

* по требованию заказчика (возможна реализация системы без резервуара для хранения дополнительного компонента и предтопка)

Таблица 3.3.7. Сравнение расходов на оборудование системы топливного хозяйства станции № 2 [144,174]

Узел	Количество	Цена/шт., тыс. руб.	Сумма, тыс. руб.
Топливное хозяйство ТЭС на жидком топливе			
Приемное устройство	1	1000	1000
Мазутохранилище	2	2400	4800
Фильтр (грубой и тонкой очистки)	9	110	990
Насос	6	37	222
Подогреватель	2	220	440
Форсунка	42	40	1680
Топливное хозяйство ТЭС на газовом топливе			
Конденсатоотвод	1	45	45
Расходомер	1	75	75
Фильтр	4	25	100
Регулятор давления	4	60	240
Клапан предохранительный	4	130	520
Клапан отсечной	7	25	175
Клапан регулирующий	7	45	315
Свеча для продувки газопровода	1	1	1
Итого			10603
Топливное хозяйство ТЭС на КЖТ			
Резервуар для хранения фильтр-кека	3	2600	7800
Резервуар для хранения отработанной горючей жидкости	1	2400	2400
Резервуар для хранения дополнительного горючего компонента*	1	1800	1800
Резервуар с гомогенизатором (основной, резервный)	14	3000	21000
Накопительная емкость готового КЖТ	7	3500	24500
Предтопок*	7	1500	10500
Устройство подачи топлива (форсунки, насос, трубопровод)	7	3500	24500
Итого			113500
Экономия при переходе на КЖТ			-102897

* по требованию заказчика (возможна реализация системы без резервуара для хранения дополнительного компонента и предтопка)

Таблица 3.3.8. Сравнение расходов на оборудование системы топливного хозяйства станции № 3 [144,174]

Узел	Количество	Цена/шт., тыс. руб.	Сумма, тыс. руб.
Топливное хозяйство ТЭС на твердом топливе			
Разгрузочное устройство	1	44000	44000
Склад	1	2000	2000
Ленточный транспортер	1	2000	2000
Дробильная установка	1	1000	1000
Пылеугольная мельница	1	25000	25000
Бункер сырого угля	2	2000	4000
Сепаратор	2	400	800
Циклон	2	200	400
Бункер угольной пыли	2	1500	3000
Питатель пыли	6	1500	9000
Взрывной предохранительный клапан	16	20	320
Дымосос инертных газов	2	100	200
Мельничный вентилятор	2	200	400
Итого			127120
Топливное хозяйство ТЭС на КЖТ			
Резервуар для хранения фильтр-кека	1	200	200
Резервуар для хранения отработанной горючей жидкости	1	100	100
Резервуар для хранения дополнительного горючего компонента*	1	100	100
Резервуар с гомогенизатором (основной, резервный)	2	1000	2000
Накопительная емкость готового КЖТ	1	2700	2700
Предтопок*	1	1000	1000
Устройство подачи топлива (форсунки, насос, трубопровод)	1	2000	2000
Итого			8100
Экономия при переходе на КЖТ			119020

* по требованию заказчика (возможна реализация системы без резервуара для хранения дополнительного компонента и предтопка)

При переходе исследованных станций с традиционных топлив (уголь, мазут, газ) на сжигание КЖТ наибольшая экономия достигается у станции № 1 (табл. 3.3.5). Это объясняется тем, что данный объект включает три вида топливных систем (для угля, газа и мазута) с большим количеством оборудования. При переходе с традиционного топлива на суспензии значительно сокращается количество необходимого оборудования для новой системы, следовательно

затраты на систему также сокращаются [144]. Аналогичные заключения сделаны для станции № 3. Не смотря на то, что топливная система для станции № 3 менее масштабна (только топливное хозяйство для угля) экономия при переходе от традиционного топлива на КЖТ является весьма очевидной по тем же причинам. Переход на суспензии для станции № 2 является экономически нецелесообразным (величина экономии отрицательная) (табл. 3.3.6).

3.3.4. Итоговые затраты, связанные с переходом ТЭС на КЖТ

С учетом расчетов, представленных в п. 3.3.1–3.3.3 произведено суммирование всех затрат, необходимых для перехода от традиционного топлива на КЖТ. Результаты представлены в таблице 3.3.9.

Таблица 3.3.9. Денежные потоки при переходе на КЖТ за 2012–2014 гг. [143,144,174]

Перечень затрат, млн. руб.	Фактическое топливо	Состав КЖТ № 1	Состав КЖТ № 2	Состав КЖТ № 3	Состав КЖТ № 4
Станция № 1					
Топливные затраты	5910,6	765,8	849,1	2302,9	3102,3
Затраты на подготовку:					
Капитальные	841,7	161,2	161,2	161,2	161,2
Эксплуатационные	46,1	13,3	13,2	12,9	13,2
Затраты на ЗШО	–	–	–	–	–
Затраты на экологические мероприятия	–	–	–	–	–
Итоговые затраты	6798,4	940,3	1023,5	2477	3276,7
Экономия	–	5858,1	5774,9	4321,4	3521,7
Станция № 2					
Топливные затраты	4734,7	450,2	499,2	1353,8	1823,8
Затраты на подготовку:					
Капитальные	10,6	113,5	113,5	113,5	113,5
Эксплуатационные	38,8	7,8	7,8	7,6	7,8
Затраты на ЗШО	–	–	–	–	–
Затраты на экологические мероприятия	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 3.3.9

Перечень затрат, млн. руб.	Фактическое топливо	Состав КЖТ № 1	Состав КЖТ № 2	Состав КЖТ № 3	Состав КЖТ № 4
Итоговые затраты	4783,6	571,5	620,5	1474,9	1945,1
Экономия	–	4212,1	4163,1	3308,7	2838,5
Станция № 3					
Топливные затраты	4	0,8	0,9	2,3	3,1
Затраты на подготовку:					
Капитальные	127,1	7,1	7,1	7,1	7,1
Эксплуатационные	0,109	0,013	0,013	0,013	0,013
Затраты на ЗШО	–	–	–	–	–
Затраты на экологические мероприятия	–	–	–	–	–
Итоговые затраты	131,2	8,9	9	10,4	11,2
Экономия	–	122,3	122,2	120,8	120

Следует отметить, что в таблице 3.3.9 при расчете денежных потоков не учитывались довольно масштабные вложения в экологические мероприятия при работе с углями разных марок, а также специфические изменения энергетических характеристик работы котельных агрегатов, проанализированные в работе [115]. Если учесть крупные штрафы, ежегодно выписываемые энергетическим предприятиям, то срок окупаемости модернизации – перехода от традиционного сжигания угля к суспензиям может изменяться от нескольких месяцев до нескольких лет. Чем больше расход топлива, тем масштабнее эффект и очевиднее преимущества КЖТ. Проведенные технико-экономические оценки показали, что для крупных ТЭС даже в случае дополнительных (не рассмотренных в настоящей работе) расходов использование КЖТ в качестве основного топлива будет экономически и экологически оправданным.

В работах [135,143,152,155] представлены относительные экологические, технико-экономические и энергетические характеристики, позволяющие выбирать оптимальные твердые и жидкие горючие компоненты КЖТ. На основании экспериментальных данных [135,143,152,155] и полученных в настоящей работе можно заключить, что суспензионное топливо могут быть чрезвычайно перспективными для любых энергетических установок (при

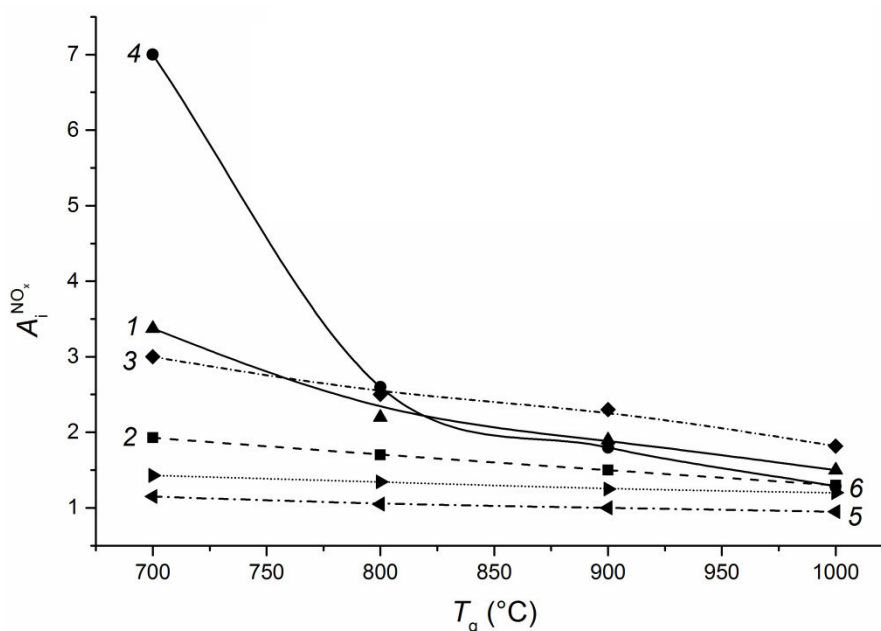
выработке тепловой и электрической энергии не только для производств, но и населения).

3.4. Относительные показатели для сравнения КЖТ с углем, мазутом и природным газом

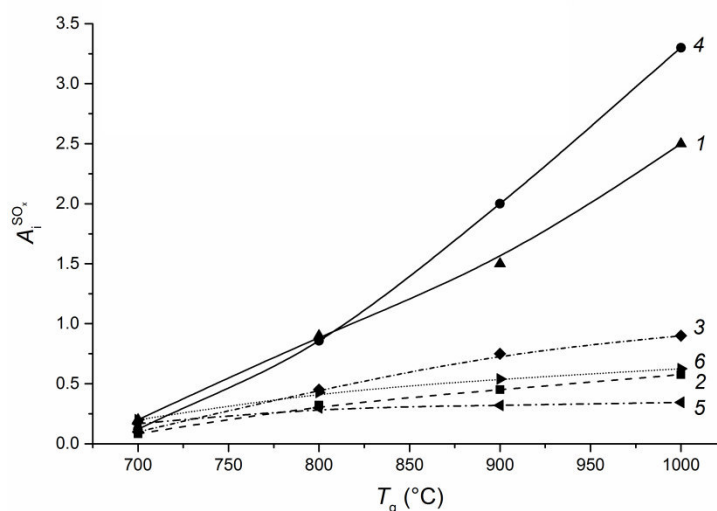
3.4.1. Первый вариант

На рисунке 3.4.1 представлены результаты вычислений, иллюстрирующие как умеренные, так и значительные (в несколько раз) превышения выбросов при использовании угля по сравнению с суспензиями [152,160,161]. Аналогичные по характеру кривые получены для всех исследованных в настоящей работе топливных композиций.

Результаты расчета общего относительного показателя по антропогенным выбросам от сжигания суспензий (1 – фильтр-кек; 2 – 89 % фильтр-кек, 10% мазут, 1% пластификатор; 3 – 89% фильтр-кек, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор) представлены в таблице 3.4.1.



a)



б)

Рисунок 3.4.1. Зависимости относительных показателей по концентрациям NO_x (а) и SO_x (б) от температуры в камере сгорания для КЖТ [152]: 1 – КЖТ 1 (фильтр-кек марки «Т»); 2 – КЖТ 2 (фильтр-кек марки «Т» с мазутом); 3 – КЖТ 3 (фильтр-кек марки «Т» с отработанным турбинным маслом); 4 – фильтр-кек марки «Д»; 5 – КЖТ 4 (фильтр-кек марки «Д» с мазутом); 6 – КЖТ 5 (фильтр-кек марки «Д» с отработанным турбинным маслом)

Таблица 3.4.1. Общий показатель по антропогенным выбросам [152]

$T_g, ^\circ C$	$A_{КЖТ\ 1}$					$A_{КЖТ\ 2}$					$A_{КЖТ\ 3}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	2,73	0,51	1,19	3,73	0,71	0,19	0,07	0,18	0,03	0,07	0,13	0,14	0,19	0,06	0,156
800	5,49	1,69	2,39	4,1	2,08	0,1	0,27	0,2	0,1	0,13	0,09	0,56	0,13	0,12	0,35
1000	9,45	4,97	6,75	7,33	6,09	0,35	0,56	0,49	0,71	0,23	0,34	1,09	0,48	0,32	0,62

Из таблицы 3.4.1 хорошо видно, что суспензии значительно выигрывают по интегральным экологическим характеристикам по сравнению с КЖТ 2, 3 и углями. С ростом температуры сжигания преимущества КЖТ становятся еще более очевидными (значения $A_{КЖТ\ 1}$, $A_{КЖТ\ 2}$ и $A_{КЖТ\ 3}$ нелинейно растут). Даже при относительно невысоких температурах отличия основных антропогенных выбросов КЖТ относительно исходных углей нельзя считать чрезвычайно большими, так как в качестве основного компонента КЖТ используются отходы,

которые в своем составе изначально содержат больше веществ, приводящих к формированию опасных газообразных оксидов.

В таблице 3.4.2 представлены результаты расчета относительных показателей по теплоте сгорания.

Таблица 3.4.2. Относительные энергетические показатели для КЖТ [152]

Марка	$M_{\text{КЖТ } 1}$	$M_{\text{КЖТ } 2}$	$M_{\text{КЖТ } 3}$
«СС»	0,361	0,471	0,493
«Т»	0,594	0,671	0,691
«К»	0,471	0,551	0,571
«Г»	0,374	0,475	0,495
«Д»	0,322	0,440	0,461

Основной недостаток КЖТ очевиден и хорошо прослеживается по таблице 3.4.2. Меньшую теплоту сгорания суспензий можно объяснить значительной долей воды в их составе. В то же время для ряда компонентов снижение теплоты сгорания можно считать умеренным (например, суспензии на основе кека «Т» имеют теплоты сгорания на 30–35 % ниже, чем у угля).

В таблице 4.3.3 приведены значения относительных экономических показателей для суспензий.

Таблица 3.4.3. Относительные экономические показатели суспензий [152]

Марка	$P_{\text{КЖТ } 1} = C_1 \cdot 100\% / C_2 \cdot 100\%$	$P_{\text{КЖТ } 2} = C_1 \cdot 100\% / (C_2 \cdot 89\% \cdot C_3 \cdot 10\%)$	$P_{\text{КЖТ } 3} = C_1 \cdot 100\% / (C_2 \cdot 89\% \cdot C_4 \cdot 10\%)$
«СС»	5,143	1,275	2,218
«Т»			
«К»			
«Г»			
«Д»			

Таблица 3.4.3 иллюстрирует кратные преимущества использования КЖТ на основе фильтр-кеков по сравнению с углями соответствующих марок.

Результаты вычисления первого варианта безразмерного показателя (произведение трех относительных показателей (по экологии, по энергетике, по

экономике)) приведены в таблице 3.4.4. Результаты вычисления второго варианта безразмерного показателя приведены в таблицах 3.4.5, 3.4.6.

Таблица 3.4.4. Безразмерные относительные показатели (экология, энергетика, экономика) [152]

$T_g, ^\circ\text{C}$	$B_{\text{КЖТ } 1}$					$B_{\text{КЖТ } 2}$					$B_{\text{КЖТ } 3}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	5,06	1,56	2,89	7,18	1,18	0,12	0,06	0,12	0,02	0,04	0,14	0,21	0,24	0,07	0,16
800	10,19	5,16	5,79	7,88	3,45	0,06	0,23	0,14	0,06	0,07	0,1	0,86	0,16	0,13	0,35
1000	17,53	15,18	16,37	14,11	10,09	0,21	0,48	0,35	0,43	0,13	0,37	1,68	0,6	0,35	0,63

Таблица 3.4.5. Относительные показатели (с учетом выбросов NO_x), МДж/(руб×ппм) [152]

$T_g, ^\circ\text{C}$	$D_{\text{уголь}}^{\text{NO}_x}$					$D_{\text{КЖТ } 1}^{\text{NO}_x}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	0,049	0,057	0,075	0,119	0,143	0,9	0,586	0,4	2,479	2,374
800	0,039	0,048	0,055	0,059	0,057	0,225	0,261	0,182	0,27	0,237
1000	0,026	0,03	0,033	0,032	0,032	0,071	0,117	0,095	0,083	0,068
$T_g, ^\circ\text{C}$	$D_{\text{КЖТ } 2}^{\text{NO}_x}$					$D_{\text{КЖТ } 3}^{\text{NO}_x}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	0,031	0,094	0,065	0,041	0,035	0,035	0,393	0,111	0,046	0,209
800	0,021	0,07	0,042	0,026	0,022	0,026	0,214	0,05	0,037	0,079
1000	0,017	0,029	0,024	0,016	0,014	0,021	0,082	0,031	0,026	0,049

Таблица 3.4.6. Относительные показатели (с учетом выбросов SO_x), МДж/(руб×ппм) [152]

$T_g, ^\circ\text{C}$	$D_{\text{уголь}}^{\text{SO}_x}$					$D_{\text{КЖТ } 1}^{\text{SO}_x}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	1,822	15,361	3,307	5,152	14,328	3,071	9,383	3,34	4,957	3,653
800	1,457	1,707	1,378	2,061	2,388	2,938	4,691	3,34	4,249	3,392
1000	0,364	0,341	0,331	0,468	0,478	2,162	2,606	2,11	3,305	2,499
$T_g, ^\circ\text{C}$	$D_{\text{КЖТ } 2}^{\text{SO}_x}$					$D_{\text{КЖТ } 3}^{\text{SO}_x}$				
	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»	«СС»	«Т»	«К»	«Г»	«Д»
700	0,292	1,095	0,554	0,374	0,321	0,549	2,355	1,163	2,12	2,932
800	0,133	0,469	0,259	0,312	0,268	0,318	1,178	0,445	0,893	1,047
1000	0,074	0,168	0,116	0,283	0,243	0,181	0,471	0,291	0,283	0,305

Представленные в таблицах 3.4.5 и 3.4.6 результаты позволяют сделать заключение о том, что приготовление суспензий из отходов углерепереработки и

отработанных масел является чрезвычайно перспективным. При этом проблема замены угля на композиции из отходов угле – и нефтепереработки является комплексной. В зависимости от экологических, экономических или экологических приоритетов целесообразно использовать все потенциальные компоненты суспензий, а также существенно варьировать температурный режим сжигания.

3.4.2. Второй вариант

В таблице 3.4.7 приведены типичные значения концентраций основных компонентов исследованных суспензий.

Таблица 3.4.7. Типичные концентрации компонентов КЖТ, принятые для дальнейших расчетов [155]

Состав топлива	Обозначение
Газовый каменный уголь (угольная пыль, размер частиц 100мкм) 100%	Уголь 1
Слабоспекающийся каменный уголь (угольная пыль, размер частиц 100мкм) 100%	Уголь 2
ВУТ (газовый каменный уголь 50%, вода 49%, пластификатор 1%)	КЖТ 1
ВУТ (слабоспекающийся каменный уголь 50%, вода 49%, пластификатор 1%)	КЖТ 2
Фильтр-кек газового каменного угля (влажный) 100%	КЖТ 3
Фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля (влажный) 100%	КЖТ 4
ОВУТ (фильтр-кек газового каменного угля 89%, мазут 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 5
ОВУТ (фильтр-кек газового каменного угля 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 6
ОВУТ (фильтр-кек газового каменного угля 89%, отработанное моторное масло 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 7
ОВУТ (фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, мазут 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 8
ОВУТ (фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 9
ОВУТ (фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, отработанное моторное масло 10%, пластификатор 1%)	КЖТ 10

1) Теплота сгорания и расход топлива

В соответствии с результатами экспериментов [91] теплоты сгорания суспензионных топлив можно определить по сумме теплот сгорания компонентов с учетом их относительной массовой концентрации. Теплоты сгорания КЖТ с учетом концентраций горючих и негорючих компонентов составили [155]: $Q_{\text{КЖТ}}$

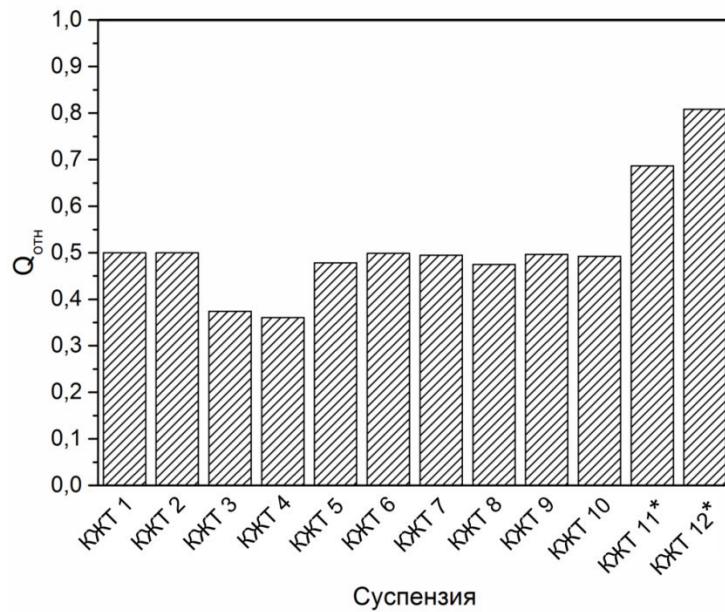
$Q_{\text{КЖТ } 1}=13,91$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 2}=13,12$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 5}=13,31$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 6}=13,87$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 7}=13,77$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 8}=12,45$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 9}=13,02$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 10}=12,91$ МДж/кг.

Теплоты сгорания использованных углей и фильтр-кеков составили [155]: $Q_{\text{уголь } 1}=27,82$ МДж/кг; $Q_{\text{уголь } 2}=26,23$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 3}=10,41$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 4}=9,46$ МДж/кг.

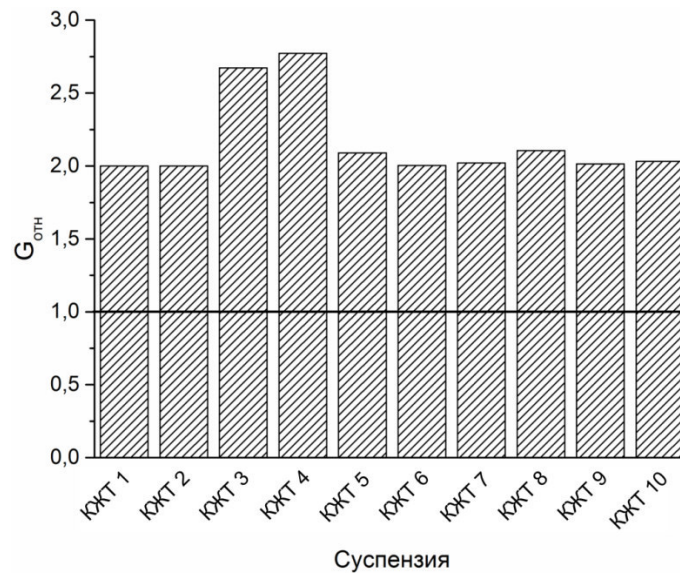
С использованием КЖТ можно получить близкие углям теплоты сгорания. Очевидно, что для этого необходимо увеличивать концентрацию горючих компонентов в составе суспензий. Имеются верхние пределы диапазона изменения концентрации горючих компонентов в составе суспензий (твердый горючий компонент – от 40 до 60 %; жидкий горючий компонент – от 0 до 20 %; пластификатор – от 0,5 до 2 %; дополнительные примеси и добавки – до 10–15% [36]). В соответствии с этими ограничениями ниже приведены значения теплоты сгорания суспензий, в которых концентрация горючего компонента максимальна [155]: $Q_{\text{КЖТ } 5}=16,21$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 6}=17,35$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 7}=17,13$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 8}=15,45$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 9}=12,08$ МДж/кг; $Q_{\text{КЖТ } 10}=16,37$ МДж/кг.

Относительные показатели по массе топлива КЖТ, необходимой для получения 20 МДж энергии, в сравнении с углем представлены на рисунке 3.4.2.

В целом можно сделать заключение о том, что по теплоте сгорания и расходу топлива (например, в час) КЖТ без добавления продуктов нефтепереработки существенно уступают сухим угольным пылевидным топливам, а в случае суспензий, содержащих продукты нефтепереработки, этот недостаток можно нивелировать за счет выбора жидкого горючего компонента с высокой теплотой сгорания.



а)



б)

Рисунок 3.4.2. Отношение теплоты сгорания ВУТ и ОВУТ к теплоте сгорания углей $Q_{отн}$ (а); отношение расходов ВУТ и ОВУТ к расходу угля $G_{отн}$ для получения идентичного количества энергии (б) [155]

* В [91] исследована широкая группа жидких горючих компонентов КЖТ и определены теплоты сгорания суспензий на их основе. Теплота сгорания некоторых суспензий (концентрации компонентов максимально допустимыми) близка к углям. В частности, КЖТ 11 (фильтр-кек «К» 80 %, исходное турбинное масло 20 %) – 20,4 МДж/кг, КЖТ 12 (фильтр-кек «Т» 80 %, отработанное турбинное масло 20 %) – 22,3 МДж/кг.

2) Антропогенные выбросы и зольный остаток

Отношение выбросов NO_x и SO_x [152,159–161] при сжигании КЖТ к аналогичным параметрам для угля представлены в таблицах 3.4.8, 3.4.9.

Таблица 3.4.8. Значения относительного коэффициента $A_{\text{NO}_x \text{ отн}}$ по выбросам NO_x [155]

Суспензия	Температура сжигания, °C			
	700	800	900	1000
КЖТ 1	0,923	0,892	0,914	0,729
КЖТ 2	0,577	0,654	0,8	0,891
КЖТ 3	0,092	0,423	0,444	0,692
КЖТ 4	0,1	0,324	0,444	0,691
КЖТ 5	1,769	1,385	1,167	1,115
КЖТ 6	2,808	1,742	1,444	1,256
КЖТ 7	0,969	0,962	0,861	0,654
КЖТ 8	0,94	1,11	1,624	1,444
КЖТ 9	1,51	1,624	1,444	1,369
КЖТ 10	0,567	0,581	0,791	0,873

Таблица 3.4.9. Значения относительного коэффициента $A_{\text{SO}_x \text{ отн}}$ по выбросам SO_x [155]

Суспензия	Температура сжигания, °C			
	700	800	900	1000
КЖТ 1	0,033	0,04	0,12	0,106
КЖТ 2	0,04	0,044	0,056	0,065
КЖТ 3	0,2	0,143	0,08	0,056
КЖТ 4	0,176	0,102	0,059	0,063
КЖТ 5	0,833	0,612	0,31	0,206
КЖТ 6	0,267	0,388	0,34	0,375
КЖТ 7	0,333	0,306	0,45	0,313
КЖТ 8	0,6	0,733	0,467	0,59
КЖТ 9	0,58	0,556	0,389	0,44
КЖТ 10	0,4	0,367	0,278	0,4

На рисунке 3.4.3. представлены диаграммы, отражающие преимущества большинства рассмотренных составов по сравнению с углем. Значения коэффициента $A_{\text{NO}_x \text{ отн}}$ в большинстве случаев не превышали 1 (рис. 3.4.3, а). Для

КЖТ 5–9 значения данного показателя превышали 1, что свидетельствует о превышении концентраций выбросов при сжигании КЖТ по сравнению с углем.

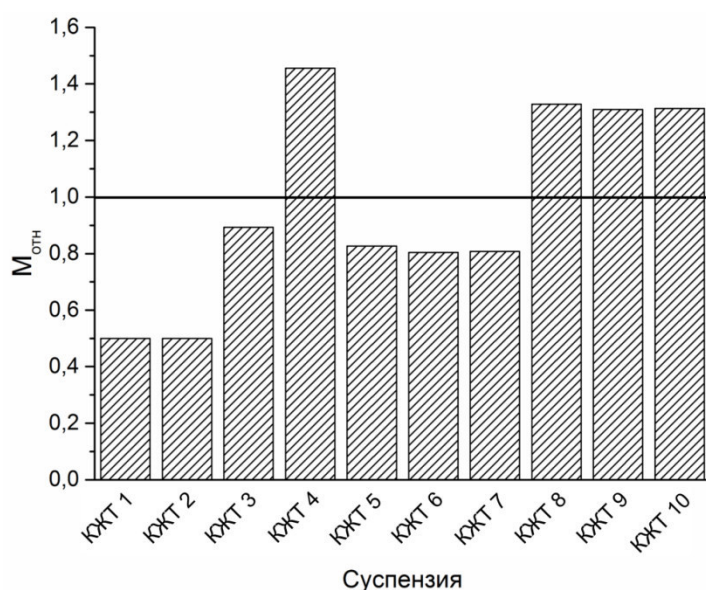


Рисунок 3.4.3. Отношение массы зольного остатка при сжигании КЖТ в сравнении с углем $M_{отн}$ [155]

Однако следует отметить, что изменяя концентрации компонентов в суспензии, можно обеспечить как рост, так и снижение выбросов NO_x . Значения относительного коэффициента $A_{SO_x \text{ отн}}$ для всех рассмотренных суспензий не превысили 1, что свидетельствует о явном преимуществе КЖТ в сравнении с углем (выбросы SO_x при сжигании угля больше, чем при сжигании КЖТ).

В [91] показано, что масса зольного остатка при сжигании КЖТ соответствует массе зольного остатка компонентов. Поэтому через относительную зольность компонентов суспензий можно сделать соответствующие оценки для суспензий и углей (рис. 3.4.3). Достаточно очевидным является существенное преимущество большинства суспензий (КЖТ 1–3, КЖТ 5–7) по сравнению с углем, так как почти половину массы составляет вода – беззольный компонент. Если же брать во внимание, что для производства одного и того же количества энергии требуется существенно больше (в 2–3 раза) массы КЖТ по сравнению с углем (рисунок 3.4.2, б), то масса зольного остатка

при сжигании суспензионных топлив может быть сопоставимой (в ряде случаев даже несколько большей) с получаемой при использовании угля. Этот аспект следует учитывать при расставлении акцентов, которые являются главными в оценках перспективности суспензионных топлив по сравнению с углями [164].

3) Максимальная температура горения

Результаты проведенных сравнительных оценок максимальных температур $T_d^{\max}$ [175], достигаемых при горении суспензий и углей приведены на рисунке 3.4.4.

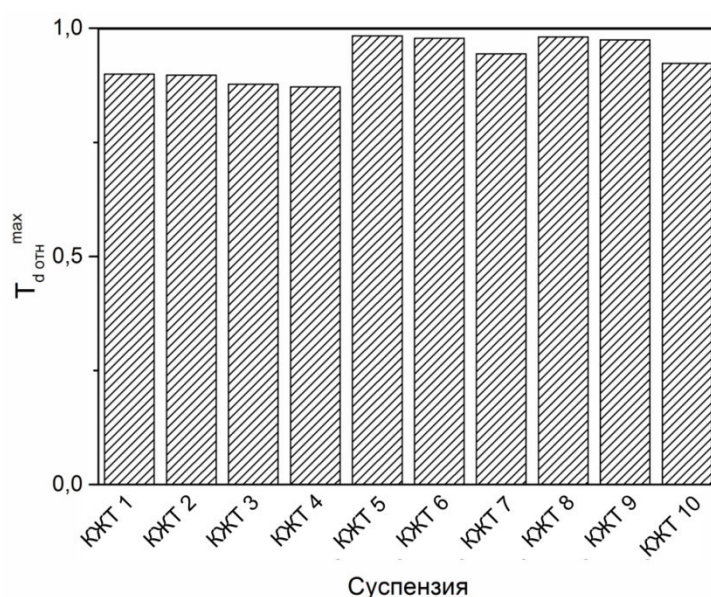


Рисунок 3.4.4. Отношения максимальных температур горения КЖТ в сравнении с углем $T_{d\text{отн}}^{\max}$ [155]

Как и следовало ожидать в соответствии с современной теорией зажигания и горения топлив, максимальные температуры горения углей больше [175], чем КЖТ. Поэтому все вычисленные отношения оказались меньше 1 (рис. 3.4.4). Это, в свою очередь, иллюстрирует важный недостаток суспензий в сравнении с углем. Однако следует отметить, что отношения для суспензий без добавления жидкого горючего компонента (КЖТ 1–4) меньше, чем для суспензий с добавлением масел и мазута (КЖТ 5–10).

4) Минимальные температуры зажигания и времена задержки инициирования горения

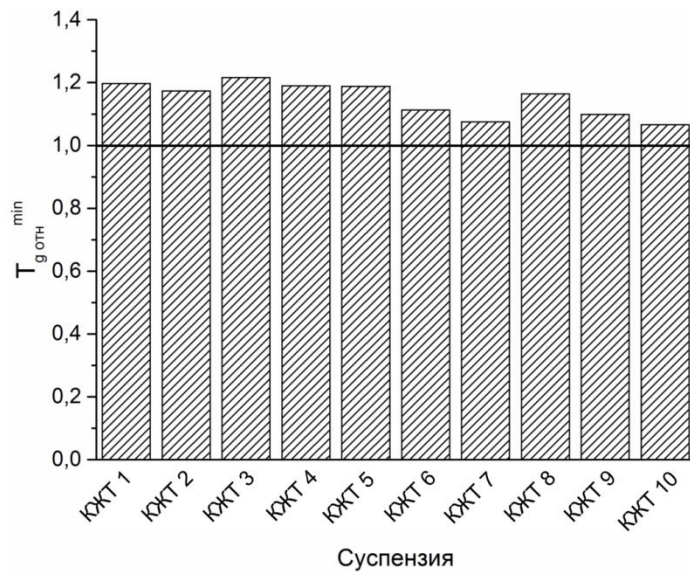


Рисунок 3.4.5. Отношения минимальных температур зажигания КЖТ и угля $T_{g \text{ отн}}^{\min}$ [91,155]

Таблица 3.4.10. Значения относительного коэффициента $\tau_{d \text{ отн}}$ по временам задержки зажигания [155]

Суспензия	Температура в печи, °С				
	477	527	577	627	677
КЖТ 1	1,667	1,429	1,577	1,698	1,857
КЖТ 2	1,667	1,667	1,708	1,698	1,857
КЖТ 3	1,6	1,571	1,673	1,566	1,667
КЖТ 4	1,778	1,833	1,917	1,93	2,143
КЖТ 5	1,7	1,714	1,855	1,755	1,889
КЖТ 6	1,556	1,5	1,5	1,465	1,571
КЖТ 7	1,111	1,083	1,042	1,047	1,086
КЖТ 8	1,533	1,55	1,458	1,395	1,486
КЖТ 9	1,5	1,429	1,491	1,377	1,444
КЖТ 10	1,1	1,071	1,091	1,038	1,067

По полученным отношениям (рисунок 3.4.5) видно, что минимальные температуры зажигания суспензий выше [90], чем углей (отношения превышают 1). Данный факт обусловлен высокой инерционностью зажигания КЖТ,

связанной с дополнительными затратами тепла и времени на испарение воды (в сравнении с процессом зажигания пылевидного угольного топлива). Одним из способов снижения инерционности зажигания композиционного жидкого топлива является включение в его состав высокореакционных добавок, например, горючих жидкостей нефтяного происхождения. В частности, для КЖТ 6 и 7 пороговые температуры зажигания меньше, соответственно, полученные отношения ближе к 1 (рисунок 3.4.5). Для составов без добавления жидкого горючего компонента (КЖТ 1–4) данные соотношения несколько больше 1. Аналогичные выводы можно сделать и для времен задержки зажигания капель КЖТ и частиц угля идентичных размеров (табл. 3.4.10).

5) Пожаровзрывобезопасность

Использование суспензий характеризуется более высокими температурами зажигания, более длительными временами прогрева перед зажиганием, а также меньшими температурами горения. Эти три показателя являются основной причиной существенно более высокой пожаровзрывобезопасности КЖТ по сравнению с угольными топливами (рисунок 3.4.6).

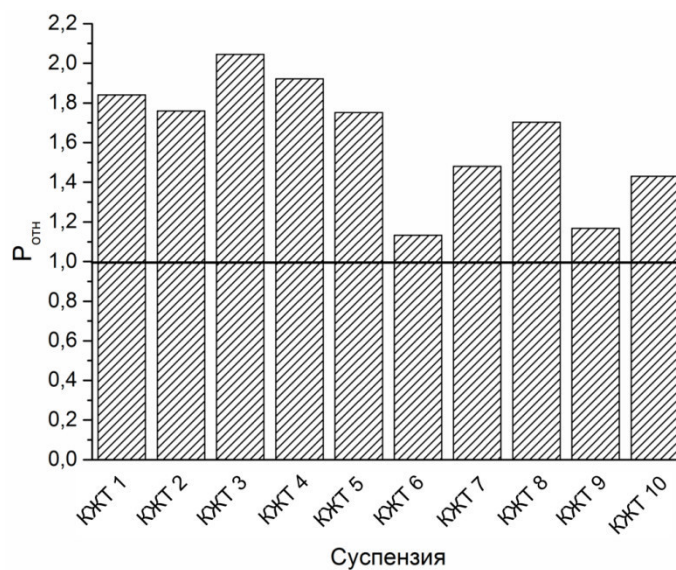
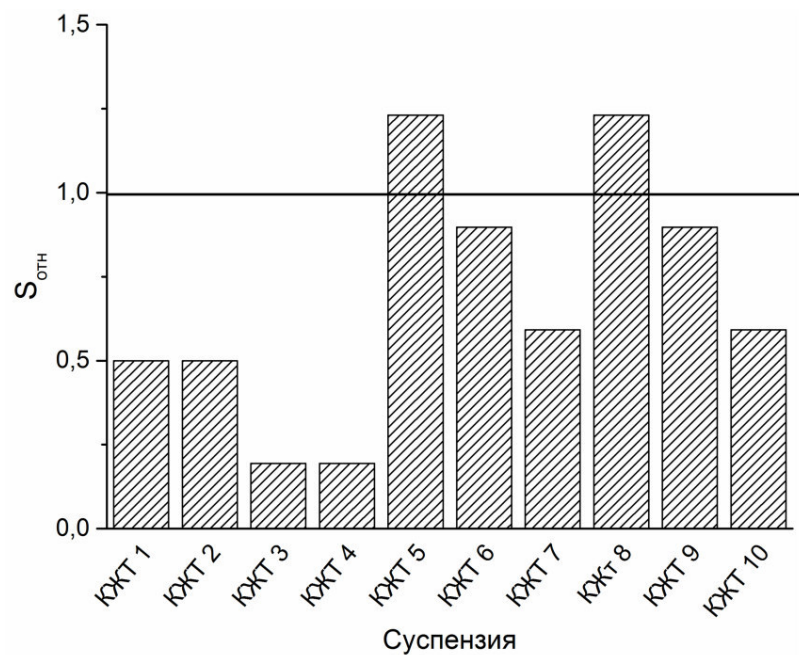


Рисунок 3.4.6. Сравнение показателя пожаровзрывобезопасности КЖТ и угля $P_{отн}$, учитывающего пороговые температуры зажигания, время задержки инициирования горения и максимальные температуры горения [155]

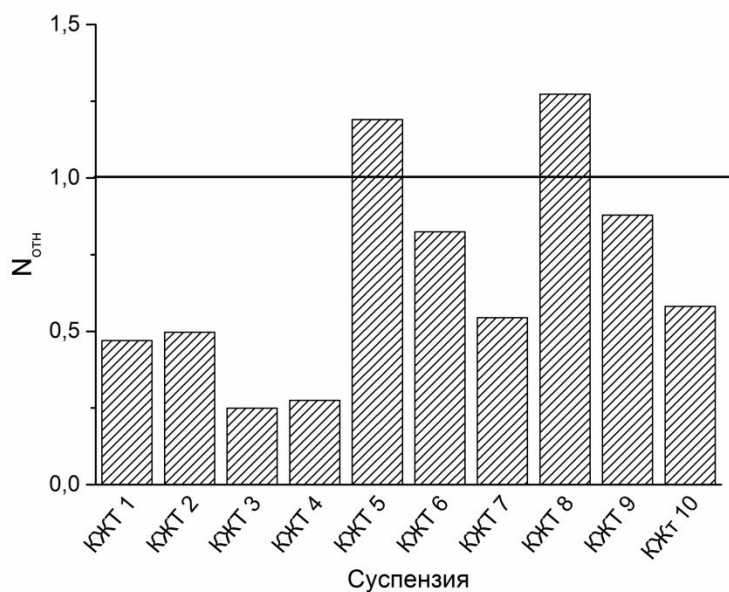
Приведенные на рисунке 3.4.6 значения иллюстрируют явное преимущество КЖТ в сравнении с углем. Показатель пожаровзрывобезопасности для суспензий существенно выше, чем для углей (значения отношений превышают 1 для всех образцов).

б) Стоимость компонентов и технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания

Проведенные технико-экономические оценки [135,143,174] показали, что с учетом расходов на хранение, транспортировку и сжигание использование КЖТ в качестве основного топлива является экономически оправданным. Исключение составили суспензии с добавлением мазута, что обусловлено стоимостью этого жидкого горючего компонента (рис. 3.4.7).



а)



б)

Рисунок 3.4.7. Отношения стоимости КЖТ и угля $S_{отн}$ (а); отношения затрат на хранение, транспортировку и сжигание КЖТ и угля $N_{отн}$ (б) [155]

7) *Обобщение результатов выполненных исследований и рекомендации по их использованию*

В таблице 3.4.11 представлены рассчитанные значения комплексного безразмерного параметра $I_{отн}$ для рассмотренных суспензий при условии, что все весовые коэффициенты равны 1, а в таблицах 3.4.12, 3.4.13 при весовых коэффициентах от 0 до 1. На рисунке 3.4.8 приведены диаграммы для демонстрации существенного отличия значений $I_{отн}$ в случае применения компонентов суспензий с разными свойствами и концентрациями в составе топливных суспензий.

Таблица 3.4.11. Значения комплексного безразмерного критерия для исследованных КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок [155]

Суспензия	$Q_{отн}$	$G_{отн}$	$A_{NOx\ отн}$	$A_{SOx\ отн}$	$M_{отн}$	$S_{отн}$	$P_{отн}$	$S_{отн}$	$N_{отн}$	$I_{отн\ 1}$	$I_{отн\ 2}$
КЖТ 1	0,5	2	0,892	0,041	0,5	0,5	1,84	0,5	0,469	5,846	0,008
КЖТ 2	0,5	2	0,654	0,044	0,5	0,5	1,76	0,5	0,498	5,787	0,006
КЖТ 3	0,374	2,672	0,423	0,143	0,893	0,194	2,045	0,194	0,25	6,489	0,005
КЖТ 4	0,361	2,773	0,324	0,102	1,455	0,194	1,922	0,194	0,275	7,013	0,005

Продолжение таблицы 3.4.11

Суспензия	$Q_{\text{отн}}$	$G_{\text{отн}}$	$A_{\text{NOx отн}}$	$A_{\text{SOx отн}}$	$M_{\text{отн}}$	$S_{\text{отн}}$	$P_{\text{отн}}$	$S_{\text{отн}}$	$N_{\text{отн}}$	$I_{\text{отн 1}}$	$I_{\text{отн 2}}$
КЖТ 5	0,478	2,09	1,167	0,612	0,827	1,231	1,752	1,231	1,191	8,283	1,516
КЖТ 6	0,499	2,004	1,742	0,388	0,804	0,897	1,133	0,897	0,824	6,838	0,455
КЖТ 7	0,495	2,02	0,962	0,306	0,808	0,592	1,481	0,592	0,545	6,235	0,114
КЖТ 8	0,475	2,106	1,022	0,733	1,329	1,231	1,703	1,231	1,273	8,866	2,657
КЖТ 9	0,497	2,014	1,624	0,556	1,31	0,897	1,168	0,897	0,879	7,667	1,088
КЖТ 10	0,492	2,031	0,581	0,367	1,313	0,592	1,431	0,592	0,582	6,654	0,138

Рассчитанные значения $I_{\text{отн}}$ соответствуют большому диапазону: 5,787–8,866 (в случае сложения $I_{\text{отн 1}}$); 0,005–2,657 (в случае умножения $I_{\text{отн 2}}$). Как следствие, появляются широкие возможности варьирования свойств топливных композиций и характеристик энергетических процессов. Можно сделать заключение, о том, что чем меньше полученное значение $I_{\text{отн 1}}$ для суспензии, тем больше перспективы ее использования в качестве основного топлива на энергетических предприятиях (для получения тепловой и электрической энергии). В частности, КЖТ 1, 2, 7, 10 являются весьма перспективными ($I_{\text{отн 1}}=5,787–6,654$).

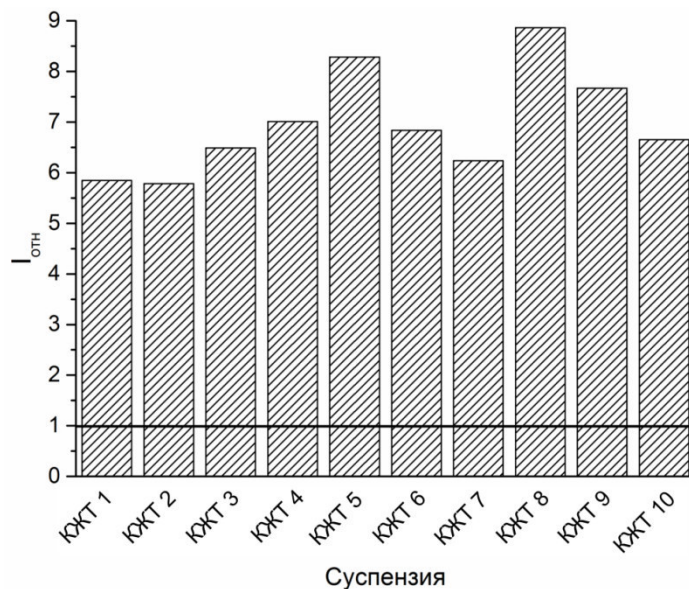


Рисунок 3.4.8. Значения комплексного безразмерного критерия $I_{\text{отн 1}}$ для КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок (значения весовых коэффициентов γ_i равны 1) [155]

Таблица 3.4.12. Значения комплексного безразмерного критерия $I_{\text{отн } 1}$ для КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок при варьировании весовых коэффициентов γ_i [155]

$I_{\text{отн } 1}$			
Образец топлива	$\gamma_1=1, \gamma_2.. \gamma_7=0,5$	$\gamma_3=1, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_4.. \gamma_7=0,5$	$\gamma_5, \gamma_6=1, \gamma_1.. \gamma_4, \gamma_7=0,5$
КЖТ 1	3,173	2,941	4,093
КЖТ 2	3,143	2,908	4,023
КЖТ 3	3,432	3,275	4,364
КЖТ 4	3,687	3,523	4,565
КЖТ 5	4,381	4,499	5,633
КЖТ 6	3,668	3,757	4,434
КЖТ 7	3,365	3,265	4,154
КЖТ 8	4,67	4,808	5,9
КЖТ 9	4,082	4,284	4,866
КЖТ 10	3,573	3,434	4,338

Таблица 3.4.13. Значения комплексного безразмерного критерия $I_{\text{отн } 2}$ для КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок при варьировании весовых коэффициентов γ_i [155]

$I_{\text{отн } 2}$			
Образец топлива	$\gamma_1=1, \gamma_2.. \gamma_7=0,5$	$\gamma_3=1, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_4.. \gamma_7=0,5$	$\gamma_5, \gamma_6=1, \gamma_1.. \gamma_4, \gamma_7=0,5$
КЖТ 1	0,00012	0,00012	0,00025
КЖТ 2	0,0000995	0,0000995	0,0002
КЖТ 3	0,0000837	0,0000837	0,00017
КЖТ 4	0,0000774	0,0000774	0,00015
КЖТ 5	0,02368	0,02368	0,04737
КЖТ 6	0,00711	0,00711	0,01422
КЖТ 7	0,00177	0,00177	0,00355
КЖТ 8	0,04152	0,04152	0,08304
КЖТ 9	0,01701	0,01701	0,03401
КЖТ 10	0,00215	0,00215	0,00431

На рисунке 3.4.9 и в таблице 3.4.14 приведены значения параметра $J_{\text{отн}}$ (для случая сложения $J_{\text{отн } 1}$ и умножения $J_{\text{отн } 2}$) для иллюстрации преимуществ суспензионных топлив по сравнению с углями.

Значения $J_{\text{отн } 1}$ больше 1 показывают, во сколько раз комплексный параметр эффективности (с точки зрения наиболее важных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) КЖТ превышает аналогичный параметр для угля. Хорошо видно, что в случае использования в составе КЖТ отходов с

высоким содержанием углерода и малой стоимостью параметр $J_{\text{отн } 1}$ максимален. Если в суспензии добавляются даже в малых объемах высококачественные, но в то же время достаточно дорогие компоненты (например, мазут), то значения $J_{\text{отн } 1}$ понижаются. Также преимущества суспензий могут быть незначительными, если в их составе используются компоненты с высокими значениями антропогенных выбросов (например, при применении смеси кека слабоспекающегося угля и мазута. Если значения $J_{\text{отн } 1}$ меньше 1, то в этом случае замена угля на суспензионные топлива нецелесообразна.

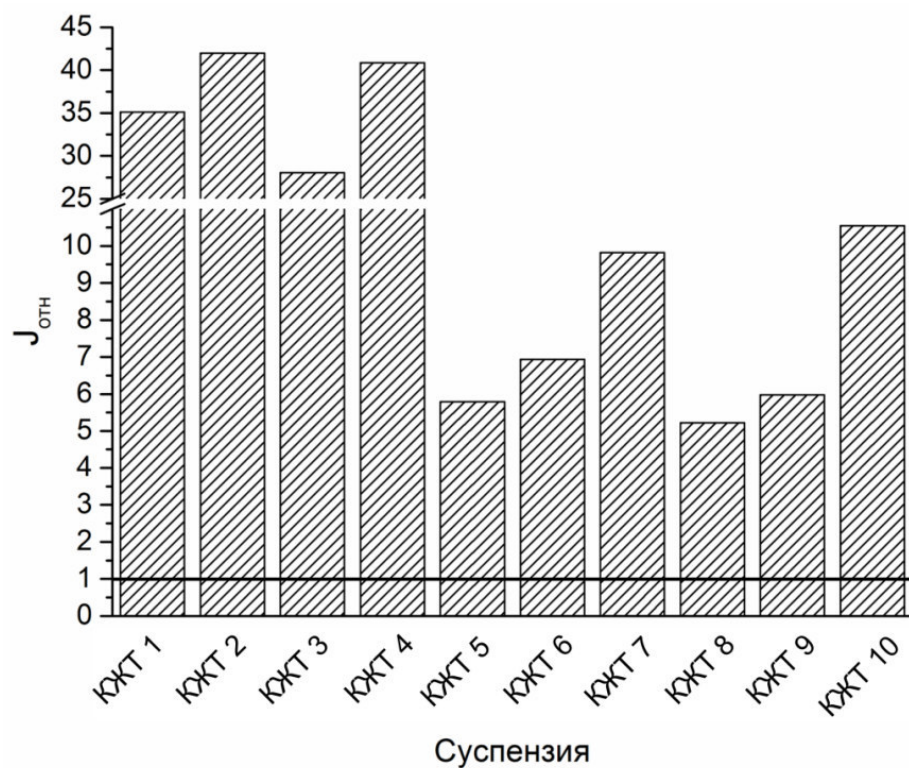


Рисунок 3.4.9. Значения комплексного безразмерного критерия $J_{\text{отн } 1}$ для КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок (значения весовых коэффициентов γ_i равны 1) [155]

Таблица 3.4.14. Значения комплексного безразмерного критерия для исследованных суспензий в сравнении с углями соответствующих марок (весовые коэффициенты γ_i равны 1) [155].

Образец топлива	$J_{отн 1}$	$J_{отн 2}$
КЖТ 1	35,13	31,781
КЖТ 2	41,978	39,27
КЖТ 3	28,052	26,135
КЖТ 4	40,874	26,249
КЖТ 5	5,79	0,151
КЖТ 6	6,932	0,547
КЖТ 7	9,825	2,157
КЖТ 8	5,222	0,085
КЖТ 9	5,974	0,227
КЖТ 10	10,548	1,759

3.5 Перспективы сжигания промышленных отходов, аккумулированных на территориях типичных заброшенных промышленных регионов, в составе КЖТ

Состояние окружающей среды на территориях типичных заброшенных промышленных регионов, Крайнего Севера и Арктики (в частности Арктической зоны Российской Федерации) вызывает нарастающую озабоченность [176,177] в связи с образованием территорий, в которых масштабы деградации естественных экосистем достигли опасных (запредельных) значений, а уровни загрязнения существенно превышают допустимые нормы. По данным СМИ (май 2019 г.) на 15% территории Арктической зоны России зафиксирован критический уровень экозагрязнения. Площади многих районов Крайнего Севера, где расположены действующие склады и хранилища горюче-смазочных материалов (ГСМ), загрязнены свалками металлолома, бытовым и строительным мусором, брошенными автотранспортными средствами, разрушенными зданиями и сооружениями хозяйственно-бытового и технического назначения, а также большим количеством металлических бочек и резервуарами с остатками ГСМ. Почвы, на которых находятся склады ГСМ, как показали исследования [178,179], загрязнены нефтепродуктами, поступающими в грунтовые воды, в реки, ручьи,

озера и заливы. В условиях сурового климата ситуация усугубляется тем, что из-за очень короткого лета биологическая рекультивация (способность водоемов к самоочищению) затруднена. Низкая температура сдерживает эти процессы.

Плачевное состояние переработки отходов в Арктике подтверждается в ежегодных докладах департаментов по охране природы регионов [178,179]. Это определяет необходимость разработки и принятия неотложных мер не только по смягчению накопленного экологического ущерба, но и по предотвращению потенциальных угроз арктическим экосистемам, связанных с нарастающей экономической и иной деятельностью в этом регионе, особенно добывающих отраслей. Привлекательным для инвесторов может стать получение прибыли от утилизации имеющихся индустриальных отходов при производстве тепловой и электрической энергии. В последние годы Правительством РФ запущены крупные финансовые проекты по освоению территорий крайнего севера, Арктики и Антарктики. Запланирована реализация крупных инфраструктурных проектов. Основу данных проектов составляет устойчивое, безопасное и энергоэффективное снабжение производств и населения тепловой и электрической энергией. Для ее производства строятся небольшие котельные и крупные тепловые электрические станции. В качестве основного топлива на данных энергопредприятиях планируется использовать дорогостоящие продукты нефте- и газопереработки. Несмотря на большие запасы ископаемых ресурсов целесообразно по экологическим и экономическим причинам использовать многочисленные и открыто хранящиеся, накапливаемые в течение многих лет на территориях крайнего севера, Арктики и Антарктики индустриальные отходы в топливном секторе данных регионов. К тому же, в последние годы существенно колеблются цены на традиционные энергоресурсы, что, безусловно, усложняет прогнозы развития регионов [4].

Масштабность сформулированной проблемы обусловлена протяженными территориями крайнего севера, Арктики и Антарктики, а также заброшенных индустриальных регионов. В частности, Арктическая зона занимает около 20 % территории России. Данный регион обеспечивает около 11 % национального

дохода страны – добывается значительное количество полезных ископаемых (апатит, никель, медь, алмазы и др.), находится более 70 % нефти и свыше 88 % газовых запасов всех российских морских акваторий. Также на территории Северного полюса находится около 24 % углеводородных запасов планеты.

В 2013 году президентом Российской Федерации была утверждена Стратегия развития Арктической зоны и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Она предусматривала, в частности, «ликвидацию экологического ущерба, причиненного в результате хозяйственной, военной и иной деятельности в Арктической зоне, включая оценку причиненного экологического ущерба и реализацию мероприятий по очистке арктических морей и территорий от загрязнения». Предлагаемый проект является чрезвычайно важным в этом плане, так как большая часть выбросов приходится на энергетический сектор с традиционными топливами. В отношении территорий крайнего севера, Арктики и Антарктики большие надежды связывают с природными ресурсами. Важно процесс освоения данных территорий проводить с минимизацией негативного экологического влияния. Нужны новые композиционные топлива с высокими экологическими, энергетическими и экономическими показателями на основе отходов переработки традиционных энергетических ресурсов. Создание таких топлив позволит решить экологические проблемы не только в энергетике, но и в транспортном секторе (например, замена дизельных топлив).

Всего в арктической зоне Российской Федерации ежегодно образуется до 1 млрд тонн отвальных пород и твердых отходов. На данной территории выделено 16 морских и прибрежных зон, где уже наблюдаются сильная трансформация естественного геохимического фона, загрязнение атмосферы, деградация растительного покрова, почвы и грунтов. Согласно данным Арктического совета в Арктике насчитывается около 100 ключевых точек, в которых наблюдаются проблемы с состоянием окружающей среды [176,177]. В мировом масштабе данная проблема выглядит глобальной.

В данной работе был произведен анализ объемов накопленных промышленных отходов на территориях Арктики и Крайнего севера (таблица 3.5.1), из числа которых были выбраны наиболее перспективные в качестве компонентов для суспензионных топлив.

Таблица 3.5.1. Сводные данные о количестве накопленных отходов на территориях Арктики и Крайнего севера (на основе данных [176,177])

Вид загрязнения	Объем	Месторасположение
Металлолом (бочки, автомобили, трубопроводы, резервуары, самолеты и пр.).	Более 350,000 тонн	Архипелаг Земля Франца-Иосифа, Новосибирские острова, остров Врангеля, Ненецкий автономный округ, Архангельская область
Нефтешламы	Более 25 м ³	Архипелага Земля Франца-Иосифа (о. Грезм-Белл)
Строительные отходы	Более 15600 м ³	Остров Земля Александры, острова архипелага Земля Франца-Иосифа
Твердые бытовые отходы, (бумага, картон, строительный мусор, резина, дерево и пр.)	Более 64000 м ³	Архипелаг Земля Франца-Иосифа
Радиоактивные отходы АЭС (атомная промышленность)	Более 10 тыс. тонн твердых и около 600 м ³ жидких радиоактивных отходов	Губа Андреева, Карское море, архипелаг Новая Земля
Горюче-смазочные материалы (авиационное топливо, дизельное топливо, бензин, отработанные масла, смазочные материалы)	Более 7000 м ³	Архипелаг Земля Франца-Иосифа, остров Врангеля
Отходы каменного угля	Более 15500 м ³	Острова архипелага Земля Франца-Иосифа
Шины и резинотехнические изделия	Более 18 м ³	Острова архипелага Земля Франца-Иосифа

В рамках данной работы проведено комплексное решение задач широкого применения композиционных топлив в теплоэнергетике с проведением экспериментов для большой группы компонентов из числа промышленных отходов, накопленных на территориях крайнего севера, Арктики и Антарктики.

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования для создания технологий приготовления, хранения, транспортировки, сжигания топливных композиций с использованием многочисленных отходов переработки традиционных энергетических ресурсов, а также адаптации пароперегревателей, экономайзеров и других элементов котельных агрегатов для работы на новых топливах. Из анализа публикаций в профильных международных журналах можно сделать вывод о том, что такое комплексное исследование не проводилось даже для уже освоенных мировым сообществом территорий. Для перспективных территорий крайнего севера, Арктики и Антарктики не разработана стратегия энергетического развития.

1) Энергетические параметры горения суспензионных топлив

На рис. 3.5.1 приведены основные характеристики процессов зажигания и горения углей, кеков и суспензионных топлив на их основе: Уголь 1 – уголь «Д», Уголь 2 – уголь «СС», Кек 1 – фильтр-кек «Д», Кек 2 – фильтр-кек «СС», ОВУТ 1 – фильтр-кек «Д» 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 2 – фильтр-кек «СС» 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %; ОВУТ 3 – уголь «Д» 39 %, вода 50 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %; ОВУТ 4 – уголь «СС» 39 %, вода 50 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %. Анализ экспериментальных результатов позволяет сделать следующее заключение: определяющими для процессов зажигания и горения суспензий являются свойства твердого горючего компонента (зольность, влажность и количество летучих). Данный вывод наглядно подтверждают суспензии, приготовленные на основе каменного угля. Такие суспензии характеризуются самыми малыми значениями времени задержки (рис. 3.5.1) и пороговых температур зажигания благодаря высокой концентрации летучих. По этой причине обоснованный интерес представляет использование добавок бурых или каменных углей в целях интенсификации зажигания при более низких температурах ОВУТ на основе менее реакционных компонентов (например, фильтр-кеков). Наибольшими

пороговыми температурами зажигания (рис. 3.5.1) характеризуются суспензии на основе фильр-кека «СС». Согласно табл. 2.1.2 данный отход характеризуется наивысшим значением зольности и меньшим задержанием летучих. В этом случае для его устойчивого зажигания требуется подвести больше тепловой энергии. Если говорить о суспензии с добавкой отработанного турбинного масла 10 % (ОВУТ 2), то для нее также пороговая температура зажигания выше, чем у суспензии фильр-кек 89 %, отработанное турбинное масло 10 % (ОВУТ 1).

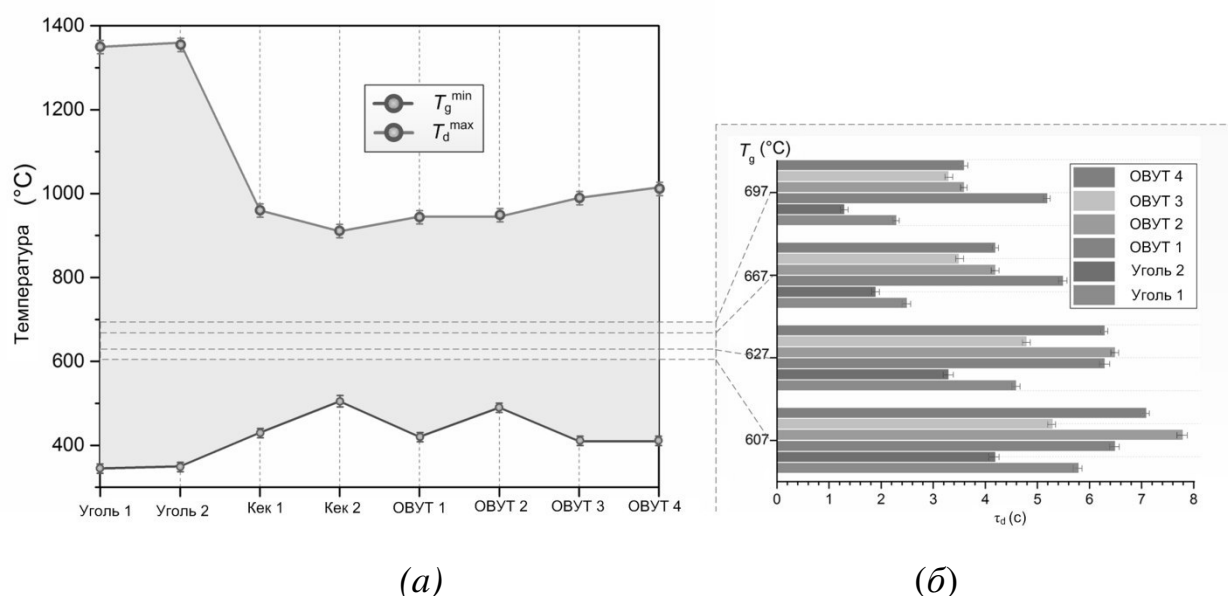


Рисунок 3.5.1. (а) Минимальные (пороговые) температуры зажигания ($T_g^{\min}$) и максимальные температуры горения ($T_d^{\max}$) суспензионных топлив на основе разных угольных компонентов и 10% отработанного турбинного масла; (б) времена задержки зажигания суспензионных топлив на основе разных угольных компонентов и 10% отработанного турбинного масла в зависимости от температуры в камере сгорания (T_g)

Для утилизации промышленных отходов, сокращения добычи и использования угля представляет интерес применение горючих отходов флотации угля. На рис. 3.5.1а представлены минимальные температуры зажигания и максимальные температуры горения исследуемых топливных композиций. Зеленая кривая на рис. 3.5.1а иллюстрирует минимальные температуры в камере сгорания, необходимые для зажигания угольной пыли и капель топлив на основе

отхода углеобогащения и отработанного турбинного масла. Для рассматриваемой группы топлив температура зажигания варьировалась в диапазоне 447–677 °С (Рис. 3.5.1а). Наиболее низкие температуры зажигания характерны для углей и суспензии с добавкой отработанного турбинного масла. Синяя кривая на Рис. 3.5.1а иллюстрирует максимальные температуры горения. Можно отметить, что суспензионные топлива значительно уступают по данным показателям угольной пыли. Для суспензий вследствие высокой влажности и использования низкосортных компонентов температура горения варьировались 960–1015 °С.

Диаграмма на рис. 3.5.1б иллюстрирует, что для изученных топлив при увеличении температуры в камере сгорания от 600 °С до 700 °С времена инициирования горения снижаются на 20–69 %, так как возрастает тепловой поток к поверхности топлива. Вследствие этого скорость прогрева всех компонентов увеличивается, и время задержки зажигания топлива соответственно уменьшается. Показано, что характеристики воспламенения угольной пыли лучше, чем у суспензий, поскольку уголь воспламеняется при более низкой температуре и с наименьшей временной задержкой по сравнению с суспензионными топливами. В основном большие времена задержки зажигания для суспензий обусловлены затратами тепла и времени на парообразование воды, которые достаточно велики (≈ 2.2 МДж/кг). Установлено, что добавление в суспензии нефтесодержащего компонента (отработанного турбинного масла) приводило к интенсификации зажигания капли полученной суспензии (рис. 3.5.1б) за счет меньших затрат энергии на испарение масла по сравнению с углем. Зажиганию ОВУТ при более низких температурах газовой среды способствуют жидкие горючие компоненты с низкими значениями температур вспышки, зажигания и теплот парообразования. Данное заключение особенно важно для суспензий, полученных из отходов углеобогащения, которые являются достаточно зольными и содержат по сравнению с угольной пылью меньшее количество летучих веществ, теплота сгорания которых может значительно ускорять прогрев и зажигание коксового остатка.

Как показали эксперименты, использование фильтр-кеков с достаточно низкой зольностью и высоким содержанием летучих, например, фильтр-кек «Д» не всегда способствует снижению времен инициирования горения суспензий. Так например на интервале температур от 667 до 697 °С времена задержки гетерогенного зажигания для ОВУТ 1 (фильтр-кек «Д» 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1%) выше, чем для топлива на основе фильтр-кека «СС». Это связано с тем, что содержащиеся в большом количестве летучие совместно с парами отработанного масла создают вокруг капли топлива облако в процессе газофазного зажигания. Данное облако газов блокирует доступ кислорода к коксовой части топлива, поэтому пока они не прогорят, гетерогенного зажигания не происходит. При более низких температурах (607 °С), напротив, у суспензии из фильтр-кека «Д» задержки зажигания ниже, чем у фильтр-кека «СС». В этом случае длительность прогорания горючих газов для фильтр-кека «Д» выше, так как при малых температурах у фильтр-кека «СС» горючая смесь накапливается медленнее, тем самым гетерогенное зажигание происходит позже. С ростом температуры скорость выхода горючих газов фильтр-кека «СС» возрастает и при температуре 627 °С задержки зажигания для суспензий на основе разных кеком становятся соизмеримы.

В то же время, компоненты с высокой зольностью, которая для некоторых фильтр-кеков (например, марки «СС») составляет около 50%, будет приводить к увеличению затрат на инициирование горения ОВУТ на их основе. В частности, сравнительно низкая исходная влажность и малое количество летучих в беззольной части кеков «СС» не будут способствовать улучшению характеристик зажигания, так как большое количество минеральных составляющих в топливе будет подавлять процесс зажигания.

2) Экологические индикаторы сжигания топлив

2.1. Сравнение выбросов при сжигании ОБУТ с добавлением жидкого горючего компонента.

Первым этапом исследований стало изучение влияния используемого жидкого горючего компонента на концентрации выбросов NO_x и SO_x при сжигании ОБУТ. Полученные результаты (рис. 3.5.2 и 3.5.3) позволяют сделать следующие заключения. Добавление 10% отработанного моторного масла к фильтр-кеку марки «СС» привело к наименьшим концентрациям выбросов (для NO_x 150–450 ппм, для SO_x 20–120 ппм) по сравнению с отработанным турбинным маслом и мазутом. Наибольшие концентрации NO_x характерны для ОБУТ с отработанным турбинным маслом (175–525 ппм). Однако установленное превышение составляет не более 15 % при этом температура в камере была на максимальном значении (1000 °C). Незначительный рост концентраций NO_x для состава с отработанным турбинным маслом (относительно других суспензий) может быть вызван локальным ростом температуры в зоне горения за испарения масла, что могло привести к интенсификации образования быстрых и термических окислов азота, которые формируются в зоне высоких температур (более 1300°C).

Наибольшие концентрации SO_x характерны для ОБУТ с мазутом (30–150 ппм). Данный результат обусловлен тем, что органические соединения серы являются природным компонентом сырой нефти. При термическом воздействии в процессе сгорания сернистые соединения из нефтепродуктов трансформируются в оксиды серы при температурах свыше 500 °C.

Данные соединения содержатся в большем количестве в тяжелой смолистой фракции нефти, чем и является мазут. Серы в дистиллятных фракциях (турбинное и моторное масло) меньше.

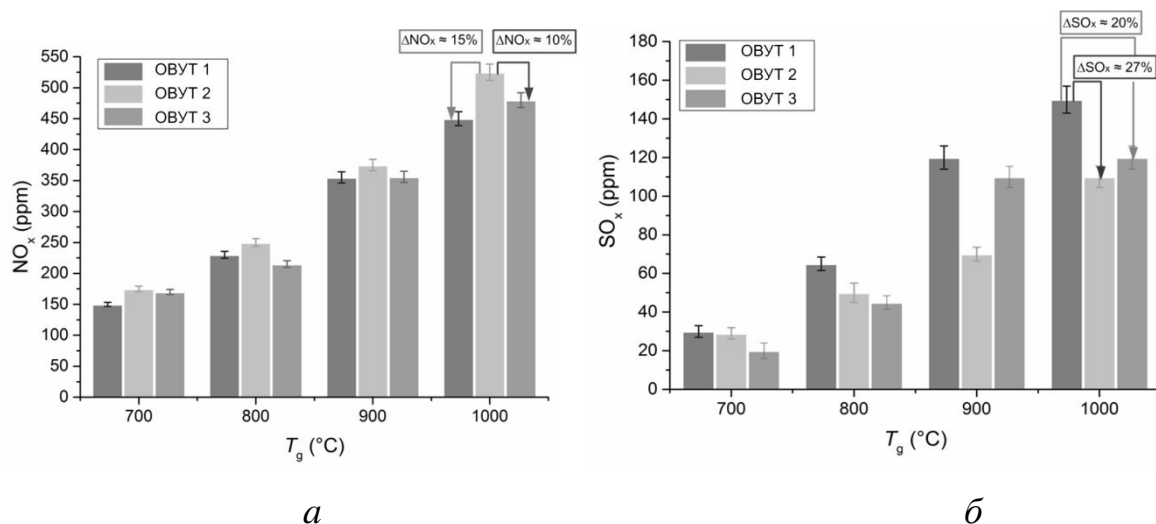


Рисунок 3.5.2. Диаграммы концентраций выбросов NO_x (а) и SO_x (б) от сжигания ОВУТ при варьировании температуры в печи: ОВУТ 1 – фильтр-кек «СС» 89%, мазут 10%, пластификатор 1%; ОВУТ 2 – фильтр-кек «СС» 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1%; ОВУТ 3 – ОВУТ фильтр-кек «СС» 89%, моторное масло 10%, пластификатор 1%

Для ОВУТ на основе фильтр-кека «Д» картина несколько иная. Добавление 10 % отработанного моторного масла привело к наибольшим концентрациям NO_x (135–374 ппм), в то время как выбросы для суспензий с мазутом и отработанным турбинным маслом находятся в приблизительно одинаковом диапазоне (75–300 ппм). В то же время выбросы SO_x для ОВУТ с добавлением мазута максимальны (20–158 ппм), а с отработанным турбинным маслом несколько меньше, чем с моторным (на 10 %). Если сравнивать между собой два отхода углеобогащения, то для фильтр-кека «СС» значения выбросов несколько выше. Данный факт можно объяснить тем, что фильтр-кек «Д» характеризуется большим количеством летучих (табл. 2.1.2), которые в совокупности с летучими, выделяющимися от сгорания жидких горючих компонентов, приводят к изменению количества выбросов. Известно, что основные азото-и серосодержащие вещества выделяются на стадии выхода летучих, в виде восстановительных промежуточных продуктов или функциональных групп, не все из которых могут превращаются в NO_x и SO_x.

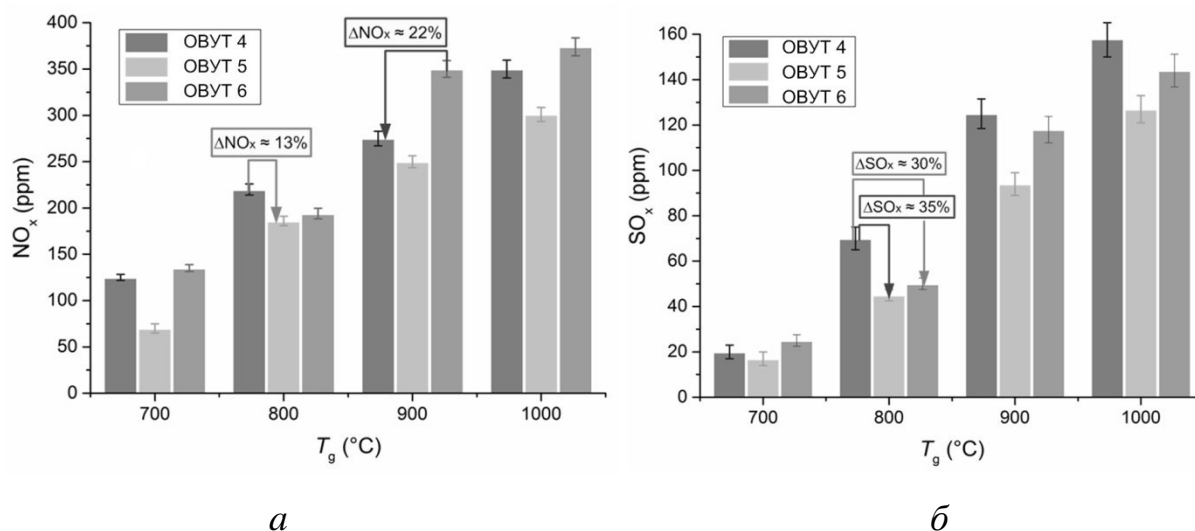


Рисунок 3.5.3. Диаграммы концентраций выбросов NO_x (а) и SO_x (б) от сжигания ОВУТ при варьировании температуры в печи: ОВУТ 1 – фильтр-кек «Д» 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 2 – фильтр-кек «Д» 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 3 – фильтр-кек «Д» 89 %, моторное масло 10 %, пластификатор 1 %

2.2. Сравнение выбросов при сжигании угля, фильтр-кека, ВУТ, ОВУТ и водомасляной эмульсии.

На рис. 3.5.4 представлены зависимости измеренных концентраций для наглядной иллюстрации масштабов изменений антропогенных выбросов при использовании углей, суспензий на их основе, отходов их переработки и водомасляной эмульсии. Чем выше температура сжигания топлив, тем заметнее отличия (рис. 3.5.4б).

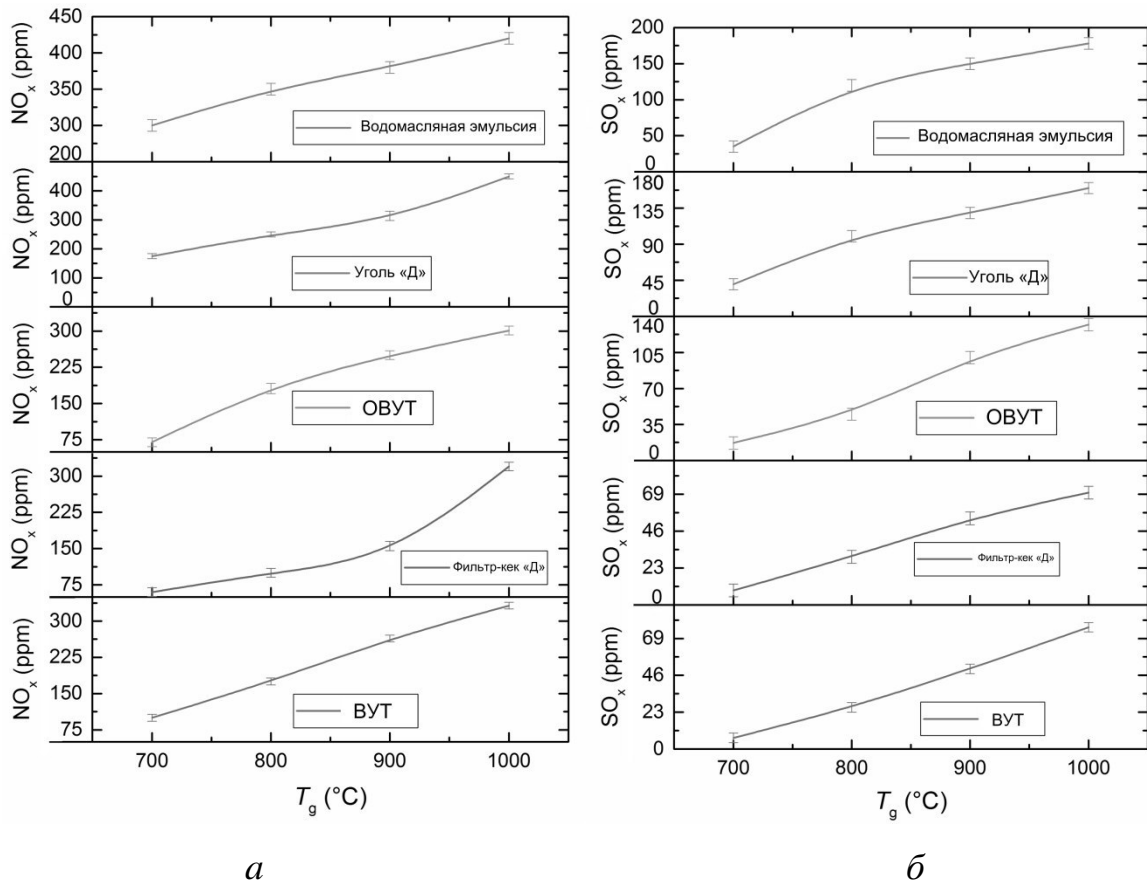


Рисунок 3.5.4. Сравнение концентраций выбросов NO_x (а) и SO_x (б) от сжигания каменного угля марки «Д», фильтр-кека каменного угля марки «Д», ВУТ (угольная пыль каменного угля марки «Д» 50 %, вода 50 %), ОВУТ (фильтр-кек марки «Д» 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %), водомасляной эмульсии (отработанное турбинное масло 50 %, вода 50 %) при варьировании температуры в печи

Полученные результаты иллюстрируют перспективность применения фильтр-кеков, ВУТ и ОВУТ в качестве экологичного топлива. В частности, водомасляная эмульсия характеризуется наибольшими выбросами NO_x (300–420 ппм) и SO_x (35–178 ппм), поэтому сжигание масла даже в разбавленном водой (или другими жидкостями) виде крайне нецелесообразно. Как и ожидалось, уголь также характеризуется достаточно высокими концентрациями рассматриваемых газов. Водоугольное топливо и фильтр-кек характеризуются самыми низкими концентрациями выбросов NO_x (60–332 ппм) и SO_x (7–76 ппм). В сравнении с углем концентрации SO_x для ВУТ и отходов углепереработки ниже на 55–75 %,

NO_x на 35–57 %. Объяснить подобное снижение можно присутствием воды в суспензиях ВУТ и кеке. Во-первых, уменьшается доля угольной части, тем самым уровень топливной серы и азота меньше. Во-вторых, из-за наличия воды, увеличивает количество свободных радикалов H_2 и CO , которые способствуют восстановлению NO и снижению концентраций оксидов серы. В-третьих, в процессе нагрева и испарения воды из топлива температура в зоне горения и скорость сгорания снижается, следовательно, образуется меньше NO_x и SO_x . Выбросы при сжигании ОБУТ несколько выше по сравнению с ВУТ в связи с присутствием в составе топлива горючего компонента, вносящего дополнительный вклад в ухудшение экологии (в некоторых случаях увеличение концентраций NO_x до 48 %, SO_x до 50 %). Экологический вклад используемых горючих жидкостей обусловлен их химическим составом, так как они имеют высокие концентрации соединений серы и азота, а также за счет высокой теплотворной способности повышают температуру в зоне горения, что напрямую влияет на процессы формирования рассматриваемых оксидов. Но если проводить сравнение с углями, то ухудшение экологических характеристик за счет добавления отработанных масел не является масштабным. С точки зрения оксидов серы при сжигании ОБУТ SO_x снижаются на 17–57 %, NO_x на 17–60 %.

2.3. Сравнение выбросов при сжигании ВУТ и ОБУТ с дополнительными горючими компонентами.

В качестве дополнительных горючих компонентов были использованы древесные опилки, углеродный остаток пиролиза автомобильных шин, мел и картон (перемолотый до состояния пыли). На рис. 3.5.5 приведены концентрации выбросов NO_x (а) и SO_x (б) от сжигания исследуемых топлив.

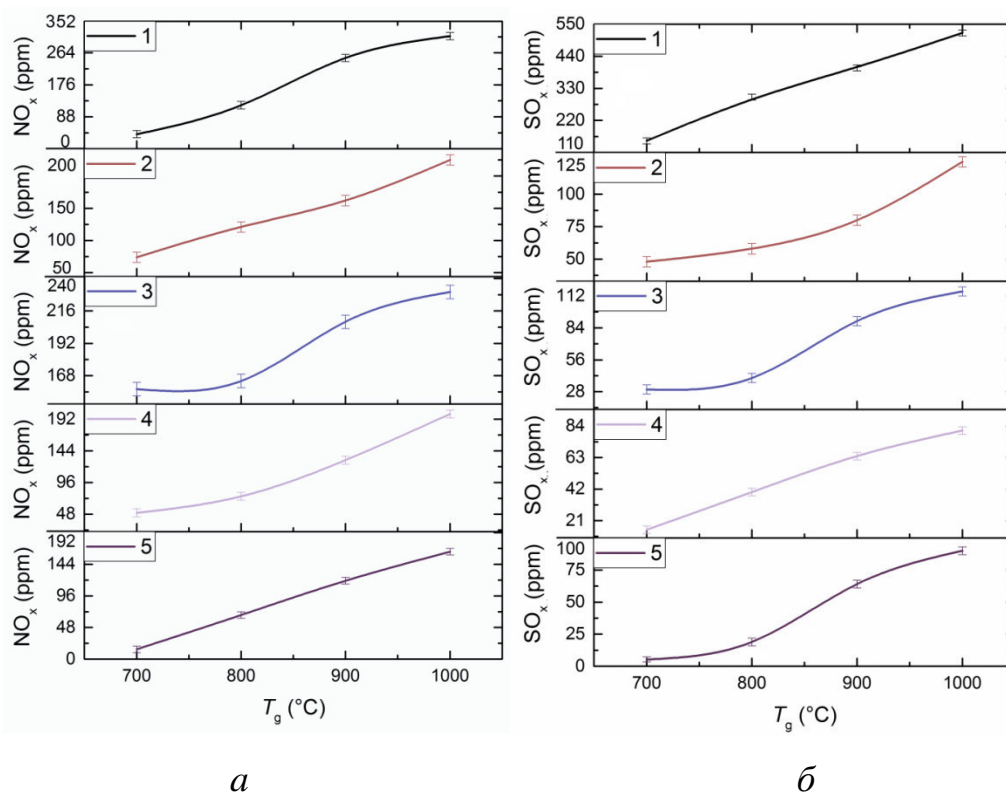


Рисунок 3.5.5. Сравнение концентраций выбросов NO_x (*a*) и SO_x (*б*) от сжигания ВУТ, ОВУТ с дополнительными горючими компонентами при варьировании температуры в печи: 1 – углеродный остаток пиролиза шин 100 %; 2 – фильтр-кек «СС» 79 %, отработанное турбинное масло 10 %, углеродный остаток пиролиза шин 10%; 3 – фильтр-кек «СС» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, опилки 10 %; 4 – фильтр-кек «Д» 90 %, картон 10 %; 5 – фильтр-кек «СС» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, известняк 10 %

Максимальные концентрации NO_x и SO_x образуются при сжигании углеродного остатка пиролиза автомобильных шин в чистом виде (кривая 1). Однако применение 10 % последнего в качестве добавки к суспензии ОВУТ (кривая 2) не влечет за собой тяжелых экологических последствий. Выход оксидов серы уменьшается на 30–75 %, концентрации оксидов азота могут быть снижены на 30 % в зависимости от температуры. С точки зрения энергетики, данная добавка позволит снизить инерционность процесса зажигания топлива за счет повышения доли органической части, а также снижения общей зольности топливного образца. Также в ходе экспериментов установлена устойчивая

тенденция реализации эффекта микровзрывов капель ОБУТ с частицами углеродного остатка. В результате данного эффекта уменьшаются размеры частиц, облегчается процесс их взаимодействия с воздухом, за счет чего они быстрее зажигаются, лучше горят и полностью выгорают.

Выбор сосновых опилок в качестве компонента ОБУТ (кривая 3) обусловлен их широким распространением, обильными запасами и низкой стоимостью. По своей природе опилки являются натуральным сырьем, они не выделяют вредных веществ при горении, содержат большое количество летучих, углерода, а также лигнин, смолы, эфирные масла, способствующие интенсификации воспламенения. Добавлением 10 % древесных опилок в суспензии ОБУТ привело к снижению концентрации NO_x на 20 % (по сравнению с данными для ОБУТ представленными на рис. 3.5.4а). Опилки способствуют интенсификации процесса зажигания и увеличению выхода монооксида углерода, который принимает участи в восстановительных реакциях в направлении формирования свободного N_2 ($\text{NO}_x + \text{CO} = \text{N}_2 + \text{CO}_2$). Относительно SO_x не наблюдается как заметного снижения, так и увеличения концентраций выбросов (рис.3.5.5б) относительно ОБУТ без добавок (рис.3.5.4б).

Наиболее распространённым способом очистки дымовых газов от сернистого ангидрида является абсорбционный, использующий в качестве сорбента недорогой и недефицитный материал – известь CaO и известняк CaCO_3 [52]. По этим причинам представляется интерес в изучении влияния частиц мела в составе органоводоугольного топлива на концентрации антропогенных выбросов. Анализ дымовых газов показал (рис. 3.5.5), что средние концентрации оксидов серы и азота на всем интервале температур (700–1000 °С) для состава с добавкой известняка ниже, чем у всех остальных ОБУТ. Выявленное уменьшение объёмов выбросов при использовании мела обусловлено химическими взаимодействиями CaCO_3/CaO и SO_x , в результате которых образуются сульфат кальция (CaSO_4) или его сульфит (CaSO_3).

Применение картона в качестве дополнительного горючего компонента для ВУТ привело к значительному снижению выбросов NO_x . В частности,

концентрации NO_x для фильтр-кека «Д» составили диапазон 10–350 ппм (рис. 3.5.4а), концентрации NO_x для суспензии на основе фильтр-кека «Д» с добавлением 10% картона составили диапазон 5–140 ппм). Снижение общего серосодержания смеси за счет присутствия картона обеспечило падение выбросов SO_x с 9–80 ппм (для чистого фильтр-кека «Д») (рис. 3.5.4б) до 12–50 ппм (для состава с картоном) (рис. 3.5.5б).

В качестве жидких негорючих компонентов в составе ОВУТ возможно использовать технологические сточные воды. В работе [180] проведены экспериментальные исследования по определению влияния качества воды (технической, водопроводной, дистиллированной) на характеристики зажигания для трех составов ВУТ (при разных относительных массовых концентрациях компонентов). Отличия между установленными значениями характеристик зажигания для ВУТ на основе разной по качеству воды составили: для времен задержки зажигания τ_d – не более 8 %, для температур в центре капли T_d – не более 6 %. Полученные отклонения являются незначительными и обуславливаются наличием в технической воде характерных большой и малой энергетике горючих примесей и стоков, испарение и горение которых ускоряет прогрев и зажигание коксового остатка. Кроме того, техническая вода содержит ионы металлов, которые, выступая в качестве катализатора для выхода летучих веществ, а также зажигания коксового остатка. Вероятно, что разное качество воды, входящей в состав сжигаемых топлив, также незначительно повлияет и на концентрации выбросов NO_x и SO_x .

3. Обобщение результатов исследований

При обобщении результатов исследований использованы два подхода, представленные в статье [181]. В первом случае приведены отношения комплексного критерия для суспензий ВУТ и ОВУТ к аналогичному критерию для угля с учетом теплоты сгорания топлива, стоимости компонентов и зарегистрированных антропогенных выбросов (рис. 3.5.6). Вторым подходом подразумевал комплексный учет относительных антропогенных выбросов при

сжигании углей, суспензий ВУТ и ОВУТ (рис. 3.5.7). Расчет производился для следующих топлив: ВУТ – уголь «Д» 49 %, вода 50 %, пластификатор 1 %; фильтр кек «Д»; ОВУТ 1 – фильтр кек «Д» 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %; ОВУТ 2 – фильтр кек «Д» 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1 %. Все рассчитанные показатели сравнивались со значениями для угля «Д». В обоих случаях за эталонное значение было выбрано значение 1. Рассчитанные показатели, которые выше 1, свидетельствуют о преимуществах суспензий в сравнении с углем.

Теплоты сгорания компонентов представлены в табл. 2.1.2. Среднерыночные стоимости угольной пыли и мазута принимались равными 0,045 \$/кг и 0,3 \$/кг, соответственно. Стоимость отходов углепереработки принимались равные 0,006 \$/кг, которая учитывала лишь затраты на транспортировку. Цена отработанного турбинного масла принималась 0.08 \$/кг. Стоимости суспензий определялись исходя из рыночных цен компонентов и пропорционально их концентрации при предположении нулевой стоимости воды. Концентрации антропогенных выбросов для рассматриваемых топлив представлены на рисунках 3.5.6, 3.5.7.

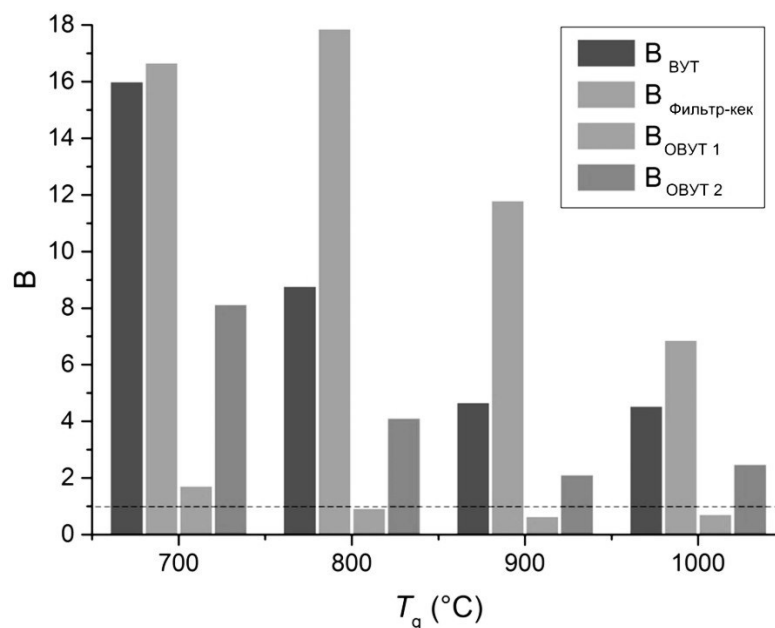


Рисунок 3.5.6. Обобщенный интегральный показатель, учитывающий основные экологические, экономические и энергетические индикаторы исследованных суспензий

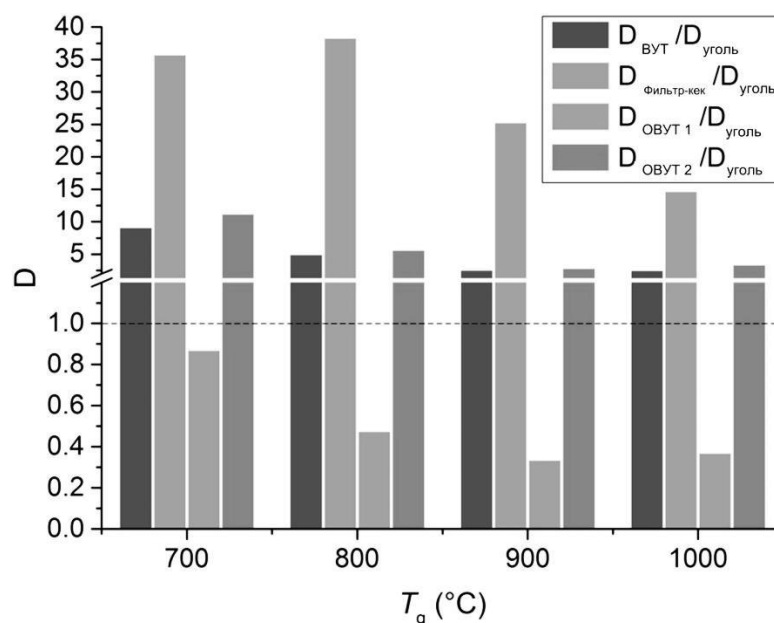


Рисунок 3.5.7. Относительный показатель, характеризующий отношение общего показателя по выбросам для каждой из исследованных суспензий к аналогичному показателю по выбросам для угля

В соответствии с расчетами получены диаграммы (рис. 3.5.6, 3.5.7), которые иллюстрирует перспективность использования отходов углеобогащения и суспензий на их основе в качестве альтернативы традиционному углю. ВУТ и ОВУТ с примесью отработанного турбинного масла значительно выигрывают по интегральным показателям в сравнении с углем. В численном эквиваленте их комплексные характеристики выше, чем у угля в 1,7–38,4 раза. Использование мазута в составе ОВУТ не характеризуется высокими комплексными показателями, в большинстве случаев данный состав уступает углю (коэффициенты B and D изменяется в диапазоне от 0,7 до 0,9 и 0,3 до 0,9, соответственно). Добавка мазута в суспензиях способствует удорожанию самого топлива, в сравнении с применением отходов нефтепереработки, чья стоимость значительно ниже. Основные преимущества топливных суспензий ВУТ и ОВУТ по сравнению с углем и ОВУТ с примесью мазута заключаются в существенно меньших антропогенных выбросах (в связи с присутствием воды в составе топлива и малой стоимости компонентов (так как используются отходы)). Так

можно отметить, что полученные значения относительных показателей можно варьировать как при оптимизации компонентного состава топливных суспензий, так и при рациональном выборе температурного режима горения.

На основании анализа рис. 3.5.6 и 3.5.7 можно сделать вывод о том, что суспензии ВУТ и ОВУТ являются перспективными топливами. Кратные значения коэффициентов иллюстрируют в ряде случаев особенно высокие комплексные значения интегральных критериев. Определяющую роль играют свойства компонентов и их концентрация в суспензиях.

Для иллюстрации экономического потенциала использования рассматриваемых топлив рассмотрим децентрализованную энергетическую структуру Арктической области России (Архангельская область, Ненецкий автономный округ, Якутия, Мурманская область, Чукотский Автономный округ, север Красноярского края, Ямало-Ненецкий автономный округ). Серьезной проблемой северного региона являются транспортные расходы и налоги на ископаемое топливо, которые значительно увеличивают стоимость энергии в Арктике. Доля транспортных расходов в итоговой стоимости топлива достигает 70 %. Цена на дизельное топливо для труднодоступных районов доходит до 450–550 \$. за тонну, что в 2–3 раза превышает мировую цену на данный товар.

Несмотря на столь сложную организацию поставки традиционного энергоресурсов в Арктических регионах России на 2016 год насчитывалось более 570 дизельных электростанций, суммарная мощность которых составляет порядка 860 МВт. Для оснащения данных станций ежегодно требуется более 1100 тыс. тонн топлива. Затраты на ввоз таких объемов энергоресурсов в удалённые северные регионы составляют порядка 615 млн. \$. Это приводит к тому, что себестоимость выработки электроэнергии доходит в отдельных районах до 0,5–2 за кВт·час. При том, что средняя по России цена электроэнергии для конечного потребителя в зоне централизованного энергоснабжения составляет 0,05 \$ за кВт·ч.

Ограниченная транспортная инфраструктура означает, что энергетические ресурсы должны быть относительно близки к населенным пунктам, чтобы их

можно было эффективно использовать. Среди доступных вариантов можно выделить имеющиеся отходы, древесные компоненты, а также ряд более богатых энергетических ресурсов, использование которых возможно в качестве добавок. Создание смесевых топлив на основе имеющихся отходов и компонентов региона с малой долей применения ввозимого сырья является одним из способов снижения затрат на доставку топлива в удаленные районы и повышения надежности их энергоснабжения. Так на основе оценочного расчета можно предположить, что для имеющихся мощностей (860 МВт) требуемая тепловая энергия от сжигания топлива должна составлять около 27 120 960 ГДж/г. При известной массе сжигаемого топлива (≈ 1100 тыс. тонн) его средняя теплотворная способность должна составить не менее 25 МДж/кг. Для достижения соответствующих тепловых характеристик необходимо увеличить расход рассматриваемых смесевых топлив в 2–3 раза в зависимости от компонентного состава суспензий (согласно теплотам сгорания, представленных в табл. 2.1.2). Однако с учетом количества аккумулированных отходов и их низкой стоимости увеличение расхода можно считать допустимым. Таким образом, использование собственных отходов региона позволит повысить энергетическую безопасность отдалённых регионов, сэкономят свыше полумиллиарда долларов (за счет снижения транспортных расходов на ввоз источников из других регионов), при этом снизить тарифы на энергию более чем на 50%. Также за счёт приближения объектов производства энергии и потребителей уменьшаться на 15–20% потери энергии в связи с транспортировкой и ее распределением. Экологическая обстановка улучшится путем снижения объёмов завоза дизельных бочек на Север (около 200 тыс. в год).

3.6. Рекомендации по использованию полученных результатов

Использование в энергетике любых видов топлива всегда характеризуется экологическим, экономическим и энергетическим аспектами. Следует отметить, что получение идеального соотношения всех характеристик топлива на сегодняшний день недостижимо, поэтому каждое предприятие выбирает

компромиссный вариант в соответствии с собственными приоритетами и внешними условиями.

Главным экономическим преимуществом композиционных жидких топлив является доступность и низкая стоимость сырья для их приготовления. Энергетические характеристики сжигания КЖТ не являются преимуществом в сравнении с угольной пылью (по причине наличия в составе воды и отходов). Однако несмотря на это, за счет существенного снижения температуры в камере сгорания (устойчивое зажигание КЖТ реализуется в диапазоне 650–900 К) возможно сокращение затрат на инициирование горения, что является положительной стороной применения суспензионных топлив. Кроме того повышения теплоты сгорания КЖТ можно добиться путем добавления жидкого горючего компонента в состав суспензии. Экологический аспект применения КЖТ является безусловным преимуществом. Так как при сжигании композиционных жидких топлив образуется существенно меньшее количество оксидов азота (на 60 %) и серы (на 30 %) и летучей золы в сравнении с традиционным сжиганием пылеугольного топлива.

По результатам выполненных экспериментальных исследований сформулирован перечень рекомендаций по практическому применению КЖТ в большой и малой энергетике:

- 1) Суспензии на основе фильтр-кеков и продуктов нефтепереработки имеют концентрации продуктов сгорания (NO_x , SO_x) ниже, чем для типичных углей. Однако фильтр-кеки представляют многочисленные отходы по всему миру с достаточно низкой стоимостью. Как следствие, очевиден экономический приоритет их широкого применения вместо углей.
- 2) Несмотря на основные недостатки КЖТ, к которым относятся меньшая теплота сгорания и температура горения, больший расход топлива, большие температуры прогрева, при которых возможно зажигание, и большие времена задержки инициирования горения (по отношению к углям), существуют способы, позволяющие их минимизировать. Эти параметры можно варьировать при рациональном выборе концентраций и свойств основных

горючих компонентов в составе КЖТ. Например, за счет добавления отработанных масел с высокой теплотой сгорания. В таком случае численные значения соответствующих относительных коэффициентов можно варьировать в широких диапазонах: $Q_{\text{отн}} = 0,36\text{--}0,5$; $G_{\text{отн}} = 2\text{--}2,77$; $T_{\text{отн}}^{\min} = 1,07\text{--}1,2$; $\tau_{\text{д отн}} = 1,04\text{--}1,9$; $T_{\text{д отн}}^{\max} = 0,87\text{--}0,98$.

- 3) Основные преимущества КЖТ по сравнению с углем заключаются в существенно меньших антропогенных выбросах и зольном остатке, малой стоимости компонентов, положительных технико-экономических показателях хранения, транспортировки и сжигания, более высокой пожаровзрывобезопасности. Значения соответствующих относительных коэффициентов составили: $A_{\text{NOx отн}} = 0,1\text{--}2,8$; $A_{\text{SOx отн}} = 0,04\text{--}0,83$; $M_{\text{отн}} = 0,5\text{--}1,45$; $S_{\text{отн}} = 0,5\text{--}1,23$; $P_{\text{отн}} = 1,13\text{--}1,27$; $N_{\text{отн}} = 0,25\text{--}1,27$. Эти параметры можно уменьшить в несколько раз не только при оптимизации компонентного состава топливных суспензий, но и при рациональном выборе температурного режима горения.
- 4) В зависимости от приоритетов (высокие требования к экологии и (или) экономике и (или) энергетике) в представленном обобщенном комплексном параметре эффективности суспензий весовые коэффициенты γ_i , можно изменять в диапазоне от 0 до 1. Полученные значения, позволят провести анализ преимуществ и недостатков использования КЖТ вместо угля с учетом повышенных требований, например, к экологии и менее жестких требований по стоимости топлива, теплоте сгорания и расходе топливных композиций. В представленном математическом выражении добавятся соответствующие множители γ_i перед каждым учитываемым фактором.
- 5) Варьирование концентрации и вида отхода в составе КЖТ позволяет в широких диапазонах изменять показатели работы ТЭС. Можно сделать заключение о том, что суспензии представляют универсальный вид топлива для получения требуемых экологических, энергетических и технико-экономических характеристик. В частности, в несколько раз можно варьировать пороговые концентрации антропогенных выбросов (оксидов серы

- и азота) предприятий угольной теплоэнергетики, на 30–40 % снизить определяющие статьи расходов и обеспечить высокие энергетические параметры работы всего котельного оборудования (вследствие более низких температур горения ОВУТ по сравнению с углем продлевается срок безаварийной эксплуатации).
- 6) Суспензии на основе отходов угле- и нефтепереработки существенно выгоднее с точки зрения экономики (экономия топливных затрат составляет диапазон от 120 млн. до 5,8 млрд. руб.) по сравнению с углями даже самого высокого сорта. При этом в зависимости от приоритетов и требований по антропогенным выбросам, стоимости топлива и энергетическим характеристикам можно варьировать концентрацию и тип компонентов КЖТ. База веществ и материалов для приготовления суспензий очень широкая: фильтр-кеки, шламы, фусы, смолы, отработанные масла и пр.
- 7) Применение представленного комплексного параметра $I_{\text{отн}}$ позволит определить эффективность (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) перевода угольных ТЭС на КЖТ в достаточно короткие сроки. При этом предприятие может выбирать приоритетные требования к характеристикам рассматриваемых топлив (теплота сгорания, расход, стоимость, антропогенные выбросы и пр.). Особенно это актуально для стран, где технологии сжигания КЖТ активно развиваются, таких как Китай, Япония, США, Россия. Кроме того разработанная модель технико-экономического обоснования позволит определить экономию затрат при переходе ТЭС различных мощностей и видов используемого топлива на КЖТ, что является основой при выборе экономической стратегии предприятия и выбора мер, с помощью которых можно добиться финансовой устойчивости.
- 8) Многих мировых производителей тепловой и электрической энергии отпугивает переход с угля на суспензионное топливо вследствие прогнозируемых требуемых достаточно больших расходов. Однако в настоящей работе показано на примере трех типичных ТЭС, что

технологические изменения на ТЭС при переходе на КЖТ окупаются в течение нескольких лет. В зависимости от действующих в стране требований к пороговым значениям антропогенных выбросов сроки окупаемости могут быть короче. В частности, в Китае и Индии подобные требования более мягкие по сравнению с Российской Федерацией.

Выводы по третьей главе

1. Определены характерные концентрации NO_x и SO_x при сжигании каменных углей разных марок, ВУТ на основе фильтр-кеков каменных углей соответствующих марок и ОВУТ на основе фильтр-кеков каменных углей соответствующих марок и продуктов нефтепереработки. Определены особенности снижения выбросов при сжигании композиционных жидких топлив.
2. Выделены оптимальные (с точки зрения энергетических и экономических характеристик) компонентные составы ОВУТ, соответствующие максимальному удельному коэффициенту «теплота сгорания / стоимость». Разработанная экономическая модель, предполагает возможность сравнения различных составов ОВУТ по показателям эффективности смеси: наименьшая стоимость ОВУТ при наибольшей теплоте сгорания, минимальное время зажигания, максимальная длительность горения, доступность компонента в регионе и пр.
3. Произведено технико-экономическое обоснование перехода ТЭС и котельной с традиционного топлива на органоводоугольные топливные композиции с учетом затрат на приобретение отдельных компонентов ОВУТ, эксплуатационных (затраты на потребляемую электроэнергию) и капитальных (затраты на изменения в технологических схемах топливных хозяйств) затрат, затрат на складирование и утилизацию золошлаковых отходов, затрат на экологические мероприятия или уплату штрафов. Определена экономия затрат при переходе на ОВУТ, которая может составлять для крупных ТЭС от 2.8 до 5.9 млрд. руб., для котельных – от 120 до 122 млн. руб.

4. Произведен расчет относительных показателей для сравнения ВУТ и ОВУТ с углем, учитывающих экологические (антропогенные выбросы и зольный остаток), энергетические (теплота сгорания, расход топлива, характеристики зажигания и горения, пожаровзрывобезопасность) и экономические (затраты на приобретение компонентов топлив, капитальные затраты, затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов, затраты на экологические мероприятия или уплату штрафов) характеристики топлив. Введен комплексный параметр $I_{\text{отн}}$, позволяющий объединить в себе все вышеперечисленные характеристики топлив. Рассчитанные значения $I_{\text{отн}}$ соответствуют большому диапазону: 5,787–8,866, значения которого можно изменять при помощи весовых коэффициентов с учетом повышенных требований, например, к экологии и менее жестких требований по стоимости топлива, теплоте сгорания и расходе топливных композиций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении работы можно сформулировать основные выводы и отметить определяющие результаты:

1. Разработан подход к проведению комплексного технико-экономического обоснование применения композиционных жидких топлив на ТЭС и котельных в качестве основного и/или дополнительного топлива, отличающийся от известных учетом наиболее значимых энергетических, экологических и экономических характеристик используемых топлив.
2. Определены относительные показатели эффективности КЖТ с учетом группы основных индикаторов (теплота сгорания и расход топлива; антропогенные выбросы и зольный остаток; максимальная температура горения; минимальные температуры зажигания; времена задержки инициирования горения; стоимость компонентов; технико-экономические показатели хранения, транспортировки и сжигания топлива; пожаровзрывобезопасность). Показано, что для КЖТ из отходов

углеобогащения и нефтепереработки данные коэффициенты могут быть в 2–10 раз выше по сравнению с углем и мазутом.

3. Выполненные исследования позволили получить экспериментальную информационную базу данных для сравнительного анализа экологических, энергетических и технико-экономических характеристик сжигания перспективных композиционных жидких топлив вместо углей разного качества.
4. Выполненные технико-экономические расчеты позволили установить, что КЖТ на основе отходов угле- и нефтепереработки существенно выгоднее с точки зрения экономики по сравнению с углями даже самого высокого сорта. При этом в зависимости от приоритетов и требований по антропогенным выбросам, стоимости топлива и энергетическим индикаторам можно варьировать концентрацию и тип компонентов КЖТ. База веществ и материалов для приготовления суспензий очень широкая: фильтр-кеки, шламы, фусы, смолы, отработанные масла и др.
5. Основные преимущества КЖТ по сравнению с углем заключаются в существенно меньших антропогенных выбросах и зольном остатке, малой стоимости компонентов, положительных технико-экономических показателях хранения, транспортировки и сжигания, более высокой пожаровзрывобезопасности. Значения соответствующих относительных показателей можно уменьшить в несколько раз не только при оптимизации компонентного состава топливных суспензий, но и при рациональном выборе температурного режима горения.
6. В представленном обобщенном комплексном параметре эффективности суспензий в зависимости от целевых индикаторов весовые коэффициенты γ_i можно изменять в диапазоне от 0 до 1 при анализе преимуществ и недостатков использования КЖТ вместо угля с учетом повышенных требований, например, к экологии и менее жестких требований по стоимости топлива, теплоте сгорания и расходе топливных композиций.

7. Технологические изменения на ТЭС и котельных при переходе на КЖТ окупаются в течение 1–3 лет. Чем больше расход топлива в энергетических установках и объемы вырабатываемой энергии, тем меньше срок окупаемости перехода на КЖТ.
8. Максимальную относительную эффективность (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) технологий сжигания КЖТ на ТЭС можно получить при широкомасштабном вовлечении отходов углеобогащения (шламов, кеков, промпродукта) в качестве основных угольных компонентов топлив. Объемы ежегодного образования таких отходов составляют 10–12 % от объемов рядового угля.
9. Переход угольных ТЭС с традиционного топлива на КЖТ позволит решить несколько глобальных проблем человечества. Первая – утилизация широкого класса отходов угле- и нефтепереработки. Это позволит не только утилизировать уже накопленные отходы (объемы составляют: отходы углеобогащения более 800 млн. тонн, отходы нефтепереработки более 1 млрд. тонн), но также предотвратить накопление вновь образующихся отходов. Вторая – снижение концентраций антропогенных выбросов предприятиями угольной энергетики (SO_x на 40 %, NO_x на 20 %), что подразумевает снижение негативного воздействия на окружающую среду, доли заболеваемости и смертности, вызванной плохим состоянием окружающего воздуха. Третья – рациональное использование природных ресурсов не только с целью сохранения природы, но и самих природных ресурсов, которые понадобятся для жизни следующим поколениям.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВУТ – водоугольное топливо;

ЗШО – золошлаковые отходы;

КЖТ – композиционное жидкое топливо;

ОВУТ – органоводоугольное топливо;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

A^d – зольность в сухом состоянии, %;

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

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

N^{daf} – содержание азота на сухое беззольное состояние, %;

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

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

T_d^{max} – максимальная температура в центре капли в процессе её нагрева, К;

T_{ign} – температура зажигания жидкого горючего нефтепродукта, К;

T_f – температура вспышки жидкого горючего нефтепродукта, К;

T_g – температура окислителя, К;

T_g^{min} – минимальная температура окислителя, необходимая для устойчивого зажигания, К;

V^{daf} – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива, %;

W^a – влажность, %;

τ_d – время задержки зажигания, с;

ρ – плотность, кг/м³;

$Q_{отн}$ – относительный показатель по теплоте сгорания КЖТ в сравнении с углем;

$G_{отн}$ – относительный показатель по массе КЖТ в сравнении с углем;

$A_{NO_x отн}$, $A_{SO_x отн}$ – относительные показатели по выбросам NO_x , SO_x от сжигания КЖТ в сравнении с углем;

$M_{отн}$ – относительный показатель по массе золы КЖТ в сравнении с углем;

$T_{d отн}^{max}$ – относительный показатель по максимальной температуре горения КЖТ в сравнении с углем;

$T_{g\text{ отн}}^{\min}$ – относительный показатель по минимальной температуре зажигания КЖТ в сравнении с углем;

$\tau_{d\text{ отн}}$ – относительный показатель по времени задержки зажигания КЖТ в сравнении с углем;

$S_{\text{отн}}$ – относительный экономический показатель КЖТ в сравнении с углем;

$P_{\text{отн}}$ – относительный показатель по пожаровзрывобезопасности КЖТ в сравнении с углем;

$I_{\text{отн}}, J_{\text{отн}}$ – комплексные безразмерные критерии для иллюстрации перспективности исследованных суспензий в сравнении с углем;

S_1 – текущие топливные затраты, руб/год;

S_2 – топливные затраты на КЖТ, руб/год;

S_3 – эксплуатационные затраты, руб/год;

S_4 – затраты на складирование и утилизацию ЗШО, руб/год;

S_5 – затраты на экологические мероприятия, руб/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qian, Y. Experimental study on evaporation characteristics of lubricating oil/gasoline blended droplet / Y. Qian, P. Zhao, C. Tao, S. Meng, J. Wei, X. Cheng // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – V. 103. – P. 99–107.
2. BP Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. – London: BP. – 2019. – 62 p. – Режим доступа: <https://www.bp.com>.
3. Dai, S. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects / S. Dai, R.B. Finkelman // *International Journal of Coal Geology*. – 2018. – V. 186. – P. 155–164.
4. Kontorovich, A.E. Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century / A.E. Kontorovich, L.V. Eder // *Russian Geology and Geophysics*. – 2014. – V. 55. – № 5–6. – P. 534–543.
5. Noli, F. 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 / F. Noli, P. Tsamos // *Science of the Total Environment*. – 2016. – V. 563–564. – P. 377–385.
6. Wang, N. Life cycle energy efficiency evaluation for coal development and utilization / N. Wang, R. Shen, Z. Wen, D. De Clercq // *Energy*. – 2019. – V. 179. – P. 1–11.
7. Guttikunda, S.K. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India / S.K. Guttikunda, P. Jawahar // *Atmospheric Environment*. – 2014. – V. 92. – P. 449–460.
8. Srikanth, R. India's sustainable development goals – Glide path for India's power sector / R. Srikanth // *Energy Policy*. – 2018. – V. 123. – P. 325–336.
9. Shrimali, G. Making India's power system clean: Retirement of expensive coal plants / G. Shrimali // *Energy Policy*. – 2020. – V. 139. – Article number 111305.
10. India Installed Capacity. Central electricity authority [Электронный ресурс]. – 2020. – 7 p. – Режим доступа: <https://www.statista.com>.
11. Chen, P. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric aerosols in the Kathmandu Valley, Nepal / P. Chen, S. Kang, C. Li,

- M. Rupakheti, F. Yan, Q. Li, Z. Ji, Q. Zhang, W. Luo, M. Sillanpää // *Science of the Total Environment*. – 2015. – V. 538. – P. 86–92.
12. Tu, Y. Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion / Y. Tu, H. Liu, K. Su, S. Chen, Z. Liu, C. Zheng, W. Li // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – V. 138. – P. 252–262.
 13. Munawer, M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes / M.E. Munawer // *Journal of Sustainable Mining*. – 2018. – V. 17. – № 2. – P. 87–96.
 14. Abas, N. Carbon conundrum, climate change, CO₂ capture and consumptions / N. Abas, N. Khan // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2014. – V. 8. – № 8. – P. 39–48.
 15. Wang, W. Human arsenic exposure and lung function impairment in coal-burning areas in Guizhou, China / W. Wang, Q. Wang, Z. Zou, F. Zheng, A. Zhang // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2020. – V. 190. – Article number 110174.
 16. Breeze, P. Combustion Plant Emissions / P. Breeze // *Electricity Generation and the Environment*. – 2017. – P. 33–47.
 17. Qian, Y. Environmental responsibility for sulfur dioxide emissions and associated biodiversity loss across Chinese provinces / Y. Qian, P. Behrens, A. Tukker, J.F.D. Rodrigues, P. Li, L. Scherer // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 245. – P. 898–908.
 18. Chen, W. Clean coal technology development in China / W. Chen, R. Xu // *Energy Policy*. – 2010. – V. 38. – № 5. – P. 2123–2130.
 19. Bacenetti, J. Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process / J. Bacenetti, M. Negri, M. Fiala, S. González-García // *Science of the Total Environment*. – 2013. – V. 463–464. – P. 541–551.
 20. Meylan, F.D. CO₂ utilization in the perspective of industrial ecology, an overview / F.D. Meylan, V. Moreau, S. Erkman // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2015. – V. 12. – P. 101–108.
 21. Fan, J.L. Efficiency evaluation of CO₂ utilization technologies in China: A super-

- efficiency DEA analysis based on expert survey / J.L. Fan, X. Zhang, J. Zhang, S. Peng // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2015. – V. 11. – P. 54–62.
22. Ma, Z. Characteristics of NO_x emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies / Z. Ma, J. Deng, Z. Li, Q. Li, P. Zhao, L. Wang, Y. Sun, H. Zheng, L. Pan, S. Zhao, J. Jiang, S. Wang, L. Duan // *Atmospheric Environment*. – 2016. – V. 131. – P. 164–170.
 23. Hou, J. A comparative study on characteristics of sulfur and nitrogen transformation and gaseous emission for combustion of bituminous coal and char / J. Hou, Y. Ma, S. Li, W. Shang // *Carbon Resources Conversion*. – 2018. – V. 1. – № 1. – P. 86–93.
 24. Fu, B. A comparative study on the mineralogy, chemical speciation, and combustion behavior of toxic elements of coal beneficiation products / B. Fu, G. Liu, M. Sun, J.C. Hower, G. Hu, D. Wu // *Fuel*. – 2018. – V. 228. – P. 297–308.
 25. Oliveira, M.L.S. Nano-mineralogical investigation of coal and fly ashes from coal-based captive power plant (India): An introduction of occupational health hazards / M.L.S. Oliveira, F. Marostega, S.R. Taffarel, B.K. Saikia, F.B. Waanders, K. DaBoit, B.P. Baruah, L.F.O. Silva // *Science of the Total Environment*. – 2014. – V. 468–469. – P. 1128–1137.
 26. Li, C. India Is Overtaking China as the World's Largest Emitter of Anthropogenic Sulfur Dioxide / C. Li, C. McLinden, V. Fioletov, N. Krotkov, S. Carn, J. Joiner, D. Streets, H. He, X. Ren, Z. Li, R.R. Dickerson // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. – № 1. – P. 1–7.
 27. Gupta, A. Health externalities of India's expansion of coal plants: Evidence from a national panel of 40,000 households / A. Gupta, D. Spears // *Journal of Environmental Economics and Management*. – 2017. – V. 86. – P. 262–276.
 28. Ge, B. Source identification of acid rain arising over Northeast China: Observed evidence and model simulation / B. Ge, Z. Wang, A.E. Gbaguidi, Q. Zhang // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2016. – V. 16. – № 6. – P. 1366–1377.
 29. Staroń, A. Studies on CWL with glycerol for combustion process / A. Staroń, Z. Kowalski, P. Staroń, M. Banach // *Environmental Science and Pollution Research*.

- 2019. – V. 26. – № 3. – P. 2835–2844.
30. Li, D. Literature overview of Chinese research in the field of better coal utilization / D. Li, D. Wu, F. Xu, J. Lai, L. Shao // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 185. – P. 959–980.
 31. Yang, Z. Environmental investigation on co-combustion of sewage sludge and coal gangue: SO₂, NO_x and trace elements emissions / Z. Yang, Y. Zhang, L. Liu, X. Wang, Z. Zhang // *Waste Management*. – 2016. – V. 50. – P. 213–221.
 32. Jianzhong, L. Pilot-scale investigation on slurrying, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / L. Jianzhong, W. Ruikun, X. Jianfei, Z. Junhu, C. Kefa // *Applied Energy*. – 2014. – V. 115. – P. 309–319.
 33. Zhao, Z. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurrying, combustion, and pollutant emission / Z. Zhao, R. Wang, L. Ge, J. Wu, Q. Yin, C. Wang // *Energy*. – 2019. – V. 168. – P. 609–618.
 34. Glushkov, D.O. 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. – Article number 124892.
 35. Dmitrienko, M.A. Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste. / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *The Science of the total environment*. – 2017. – V. 598. – P. 21–27.
 36. Glushkov, D.O. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Y. Chernetskii // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63. – № 10. – P. 707–717.
 37. Hu, G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review / G. Hu, J. Li, G. Zeng // *Journal of Hazardous Materials*. – 2013. – V. 261. – P. 470–490.
 38. Boughton, B. Environmental Assessment of Used Oil Management Methods / B. Boughton, A. Horvath // *Environmental Science and Technology*. – 2004. – V. 38. – № 2. – P. 353–358.

39. Lee, S. Handbook of Alternative Fuel Technologies / S. Lee, J.G. Speight, S.K. Loyalka [Электронный ресурс]. – London: Taylor & Francis Group. – 2007. – 525 p. – Режим доступа: <http://www.liu.umd.edu>.
40. Архипкин, О.О. Современные подходы к использованию водоугольного топлива / О.О. Архипкин, А.Г. Морозов // Экологический вестник России. – 2011. – № 9. – С. 20–25.
41. Hashimoto, N. CWM: Its Past, Present and Future / N. Hashimoto // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 1999. – V. 21. – № 1. – P. 3–22.
42. Cheng, J. Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics / J. Cheng, J. Zhou, Y. Li, J. Liu, K. Cen // Fuel. – 2008. – V. 87. – № 12. – P. 2620–2627.
43. Miller B.G. Pilot- & Laboratory-Scale Stationary Combustion Facilities / B.G. Miller, S. Pisupati // Earth and Material Science: Energy institute. – 2017. – P. 1–2.
44. Зайденварг, В.Е. Производство и использование водоугольного топлива / В.Е. Зайденварг, К.Н. Трубецкой, В.И. Мурко, И.Х. Нехороший. – М.: Издательство Академии горных наук, 2001. – 176 с.
45. Murko, V.I. Results of study of sulfur oxide reduction during combustion of coal-water slurry fuel through use of sulfur capturing agents / V.I. Murko, V.I. Karpenok, Y.A. Senchurova, O.V. Tailakov, A.R. Bogomolov, V.A. Khyamyalyainen // MATEC Web Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number 01074.
46. Bhattacharya, M. The role of technology on the dynamics of coal consumption–economic growth: New evidence from China / M. Bhattacharya, S. Rafiq, S. Bhattacharya // Applied Energy. – 2015. – V. 154. – P. 686–695.
47. Wang, H. Ignition and Combustion Behaviors of Coal Slime in Air / H. Wang, S. Liu, X. Wang, Y. Shi, X. Qin, C. Song // Energy and Fuels. – 2017. – V. 31. – № 10. – P. 11439–11447.
48. Vershinina, K.Y. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study / K.Y. Vershinina, N.E. Shlegel,

- P.A. Strizhak // *Fuel*. – 2019. – V. 238. – P. 275–288.
49. Gao, W. Ignition temperatures of various bio-oil based fuel blends and slurry fuels / W. Gao, M. Zhang, H. Wu // *Fuel*. – 2017. – V. 207. – P. 240–243.
 50. Wang, C. Influence of alkaline additive on viscosity of coal water slurry / C. Wang, H. Zhao, Z. Dai, W. Li, H. Liu // *Fuel*. – 2019. – V. 235. – P. 639–646.
 51. Liu, P. An Experimental Study of the Rheological Properties and Stability Characteristics of Biochar-Algae-Water Slurry Fuels / P. Liu, M. Zhu, Y.K. Leong, Y. Zhang, Z. Zhang, D. Zhang // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 105. – P. 125–130.
 52. Nyashina, G.S. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal / G.S. Nyashina, K.Y. Vershinina, M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *Journal of Hazardous Materials*. – 2018. – V. 347. – P. 359–370.
 53. Zhang, Z. Numerical simulation and experimental analysis on nitrogen and sulfur oxides emissions during the co-combustion of Longyan anthracite and sawmill sludge / Z. Zhang, Q. Zeng // *Fuel*. – 2019. – V. 254. – Article number 115611.
 54. Key World Energy Statistics [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency. – 2017. – 97 p. – Режим доступа: <http://large.stanford.edu/courses/2018/ph241/koshy1/docs/keyworld-2017.pdf>.
 55. Proposed coal-fired plants by installed capacity (MW) [Электронный ресурс]. – World Resources Institute. – 2012. – Режим доступа: <https://www.wri.org/resources/data-visualizations/proposed-coal-fired-plants-installed-capacity-mw>
 56. World energy resources [Электронный ресурс]. – London: World Energy Council. – 2016. – 1028 p. – Режим доступа: <https://www.worldenergy.org>.
 57. Energy and Air Pollution for the World Energy Outlook Special Report 2016 [Электронный ресурс]. – Paris: International Energy Agency. – 2016. – 266 p. Режим доступа: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13467/1/WorldEnergyOutlookSpecialReport2016EnergyandAirPollution.pdf>
 58. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации: 2019

- Прогнозы спроса на уголь: видение 2019 [Электронный ресурс]. – Энергетический бюллетень. – № 79. – Режим доступа: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/energo_dec2019.pdf
59. Chen, J. Atmospheric emissions of F, As, Se, Hg, and Sb from coal-fired power and heat generation in China / J. Chen, G. Liu, Y. Kang, B. Wu, R. Sun, C. Zhou, D. Wu // *Chemosphere*. – 2013. – V. 90. – № 6. – P. 1925–1932.
 60. A Dwindling Role for Coal. Union of Concerned Scientists [Электронный ресурс]. – 2017. – 7 p. – Режим доступа: <https://www.ucsusa.org/resources/dwindling-role-coal>
 61. Jiang, X.M. Progress and recent utilization trends in combustion of Chinese oil shale / X.M. Jiang, X.X. Han, Z.G. Cui // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2007. – V. 33. – № 6. – P. 552–579.
 62. Zhang, Y. Fuel nitrogen conversion and release of nitrogen oxides during coal gangue calcination / Y. Zhang, X. Ge, L. Liu, X. Wang, Z. Zhang // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2015. – V. 22. – № 9. – P. 7139–7146.
 63. Liu, J. Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler / J. Liu, X. Jiang, L. Zhou, H. Wang, X. Han // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – V. 167. – № 1–3. – P. 817–823.
 64. Fan, M. The Winter Choke: Coal-Fired Heating, Air Pollution, and Mortality in China / M. Fan, G. He, M. Zhou // *Journal of Health Economics*. – 2020. – V. 71. – P. 102316.
 65. Sharabura, T.A. Ecological aspects of the thermal processing of water-coal fuel / T.A. Sharabura, V.A. Pinchuk, N. Devčić // *Summaries of lectures of the 10th international symposium of Croatian Metallurgical Society SHMD '2012: Materials and Metallurgy*. – 2012. – P. 429–429.
 66. Staroń, A. Impact of waste soot on properties of coal-water suspensions / A. Staroń, M. Banach, Z. Kowalski, P. Staroń // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – V. 135. – P. 457–467.
 67. Cuéllar-Franca, R.M. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A

- critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts / R.M. Cuéllar-Franca, A. Azapagic // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2015. – V. 9. – P. 82–102.
68. Markewitz, P. Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO₂ / P. Markewitz, W. Kuckshinrichs, , W. Leitner, J. Linssen, P. Zapp, R. Bongartz, A. Schreiber, T.E. Müller // *Energy and Environmental Science*. – 2012. – V. 5. – № 6. – P. 7281–7305.
 69. Gu, M. Study on combustion characteristics of two sizes pulverized coal in O₂/CO₂ atmosphere / M. Gu, C. Wu, Y. Zhang, H. Chu // *Journal of CO₂ Utilization*. – 2014. – V. 7. – P. 6–10.
 70. MacKrory, A.J. Measurement of nitrogen evolution in a staged oxy-combustion coal flame / A.J. MacKrory, D.R. Tree // *Fuel*. – 2012. – V. 93. – P. 298–304.
 71. Fujimori, T. Realization of oxyfuel combustion for near zero emission power generation / T. Fujimori, T. Yamada // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2013. – V. 34. – № 2. – P. 2111–2130.
 72. Williams, A. Combustion of pulverised coal and biomass / A. Williams, M. Pourkashanian, J.M. Jones // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2001. – V. 27. – № 6. – P. 587–610.
 73. Vuthaluru, H.B. Investigations into the pyrolytic behaviour of coal/biomass blends using thermogravimetric analysis / H.B. Vuthaluru // *Bioresource Technology*. – 2004. – V. 92. – № 2. – P. 187–195.
 74. Long, H. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review / H. Long, X. Li, H. Wang, J. Jia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – V. 26. – P. 344–352.
 75. Nyashina, G.S. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals / G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2020. – V. 258. – Article number 113682.
 76. Bhuiyan, A.A. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace / A.A. Bhuiyan, A.S. Blicblau, A.K.M.S. Islam, J.

- Naser // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – V. 91. – № 1. – P. 1–18.
77. Kuznetsov, G.V. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, A.A. Kostoreva, Z.A. Kostoreva, N.A. Nigay // *Fuel*. – 2020. – V. 274. – Article number 117843.
 78. Lee, B.H. Combustion behavior of low-rank coal impregnated with glycerol / B.H. Lee, L. Sh, J.S. Bae, Y.C. Choi, C.H. Jeon // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – V. 87. – P. 122–130.
 79. Бородуля, В.А. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей / В.А. Бородуля, Э.К. Бучилко, Л.М. Виноградов // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 31–36.
 80. Мальцев, Л.И. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, С.И. Лазарев, Д.А. Лапин // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 25–30.
 81. Баранова, М.П. Экологически чистая технология получения водоугольных суспензий из низкометаморфизированных углей / М.П. Баранова, Т.А. Кулагина // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2010. – № 12. – С. 32–35.
 82. Zhao, X. Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry / X. Zhao, W. Zhu, J. Huang, M. Li, M. Gong // *Journal of the Energy Institute*. – 2015. – V. 88. – № 2. – С. 105–111.
 83. Liu, J.. An investigation on the rheological and sulfur-retention characteristics of desulfurizing coal water slurry with calcium-based additives / J. Liu, W. Zhao, J. Zhou, J. Cheng, G. Zhang, Y. Feng, K. Cen // *Fuel Processing Technology*. – 2009. – V. 90. – № 1. – С. 91–98.
 84. Shen, Y. A novel desulphurization process of coal water slurry via sodium metaborate electroreduction in the alkaline system / Y. Shen, T. Sun, J. Jia // *Fuel*. – 2012. – V. 96. – P. 250–256.
 85. Wang, H. A new fluidization-suspension combustion technology for coal water slurry / H. Wang, X. Jiang, M. Zhang, Y. Ma, H. Liu, S. Wu // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2010. – V. 49. – № 10. – P.

- 1017–1024.
86. Deng, S. Emission characteristics of Cd, Pb and Mn from coal combustion: Field study at coal-fired power plants in China / S. Deng, Y. Shi, Y. Liu, C. Zhang, X. Wang, Q. Cao, S. Li, F. Zhang // *Fuel Processing Technology*. – 2014. – V. 126. – P. 469–475.
 87. Алексеенко, С.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив / С.В. Алексеенко, С.Э. Пашенко, В.В. Саломатов // *Инженерно-физический журнал*. – 2010. – Т. 86. – № 4. – С. 682–693.
 88. Сыродой, С.В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива / С.В. Сыродой, Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов // *Химия твердого топлива*. – 2015. – № 6. – С. 28–34.
 89. Glushkov, D.O. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zhakharevich, P.A. Strizhak // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 148. – P. 224–235.
 90. Glushkov, D.O. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, K.Y. Vershinina // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 96. – P. 534–546.
 91. Glushkov, D.O. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D.O. Glushkov, S.Y. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak // *Energy & Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 4. – P. 3441–3450.
 92. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // *Fuel*. – 2011. – V. 90. – № 2. – P. 865–877.
 93. Okasha, F. Modeling of wet jet in fluidized bed / F. Okasha, M. Miccio // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – V. 61. – № 10. – P. 3079–3090.
 94. Miccio, F.. Formation rates of characteristic carbon phases during fuel-water slurry injection in a hot fluidized bed / F. Miccio, M. Miccio, F. Okasha // *Powder Technology*. – 1997. – V. 91. – № 3. – P. 237–251.
 95. Wang, H. Experiment and Grey Relational Analysis of CWS Spheres Combustion in a Fluidized Bed / H. Wang, X. Jiang, J. Liu, W. Lin // *Energy and Fuel*. – 2007.

- V. 21. – № 4. – P. 1924–1930.
96. Murko, V.I.. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel / V.I. Murko, V.I. Fedyaev, V.I. Karpenok, I.M. Zasypkin, Y.A. Senchurova, A. Riesterer // *Thermal Science*. – 2015. – V. 19. – № 1. – P. 243–251.
 97. Bo, Y. Combustion characteristics of coal-water slurry in a slag-tap vertical cyclone furnace through digital imaging / Y. Bo, Z. Huang, Q. Huang, Y. Zhang, J. Zhou, K. Cen // *Energy and Fuels*. – 2013. – V. 27. – № 6. – P. 3427–3437.
 98. Вершинина, К.Ю. Низкотемпературное зажигание отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: спец. 01.04.17 / Вершинина Ксения Юрьевна. – НИ ТПУ:Томск, 2016. –191 с.
 99. Валиуллин, Т.Р. Повышение эффективности сжигания композиционного жидкого топлива на тепловых электрических станциях по условиям его зажигания: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: спец. 05.14.14: спец. 01.04.14 / Валиуллин Тимур Радисович. – НИ ТПУ:Томск, 2017. – 170 с.
 100. Мальцев, Л.И. Влияние высокоэнергетического воздействия на физико-технические характеристики угольных топлив / Л.И. Мальцев, Т.П. Белогурова, И.В. Кравченко // *Теплоэнергетика*. – 2017. – № 8. – С. 43–49.
 101. Chen, R. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels / R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang // *Fuel*. – 2011. – V. 90. – № 4. – P. 1689–1695.
 102. Zhang, G.H. Influence of side-chain structure of polycarboxylate dispersant on the performance of coal water slurry / G.H. Zhang, N. Zhu, Y.B. Li, J.F. Zhu, Y.R. Jia, L. Ge // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – V. 161. – P. 1–7.
 103. Burdukov, A.P. The rheodynamics and combustion of coal–water mixtures / A.P. Burdukov, V.I. Popov, V.G. Tomilov, V.D. Fedosenko // *Fuel*. – 2002. – V. 81. – № 7. – P. 927–933.
 104. Gürses, A. osities of coal-water mixture prepared with Erzurum-Aşkale lignite

- coal / A. Gürses, M. Açıkyıldız, Ç. Doğar, S. Karaca, R. Bayrak // *Fuel Processing Technology*. – 2006. – V. 87. – № 9. – P. 821–827.
105. Meikap, B.C. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal-water slurries / B.C. Meikap, N.K. Purohit, V. Mahadevan // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2005. – V. 281. – № 1. – P. 225–235.
 106. Boylu, F. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries / F. Boylu, H. Dinçer, G. Ateşok // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – V. 85. – № 4. – P. 241–250.
 107. Sahoo, B.K. Rheological characteristics of coal-water slurry using microwave pretreatment - A statistical approach / B.K. Sahoo, S. De, M. Carsky, B.C. Meikap // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2011. – V. 17. – № 1. – P. 62–70.
 108. Qiu, X. Evaluation of sulphonated acetone-formaldehyde (SAF) used in coal water slurries prepared from different coals / X. Qiu, M. Zhou, D. Yang, H. Lou, X. Ouyang, Y. Pang // *Fuel*. – 2007. – V. 86. – № 10–11. – P. 1439–1445.
 109. Zhou, M. High-performance dispersant of coal-water slurry synthesized from wheat straw alkali lignin / M. Zhou, X. Qiu, D. Yang, H. Lou, X. Ouyang // *Fuel Processing Technology*. – 2007. – V. 88, № 4. – P. 375–382.
 110. Tiwari, K. Highconcentration coal-water slurry from Indian coals using newly developed additives / K. Tiwari, S. Basu, K. Bit, S. Banerjee, K. Mishra // *Fuel Processing Technology*. – 2004. – V. 85. – № 1. – P. 31–42.
 111. Karatepe, N. Adsorption of a non-ionic dispersant on lignite particle surfaces / N. Karatepe // *Energy Conversion and Management*. – 2003. – V. 44. – № 8. – P. 1275–1284.
 112. Tavangar, S. CFD simulation for secondary breakup of coal-water slurry drops using OpenFOAM / S. Tavangar, S.H. Hashemabadi, A. Saberimoghdam // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – V. 132. – P. 153–163.
 113. Shin, Y.-J. Preparation of coal slurry with organic solvents. / Y.-J. Shin, Y.-H. Shen // *Chemosphere*. – 2007. – V. 68. – № 2. – P. 389–393.

114. Minakov, A.V. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals / A. V. Minakov, A.A. Shebeleva, P.A. Strizhak, M.Y. Chernetskiy, R.S. Volkov // *Fuel*. – 2019. – V. 254. – Article number 115606.
115. Nyashina, G. Environmental Potential of Using Coal-Processing Waste as the Primary and Secondary Fuel for Energy Providers / G. Nyashina, J.C. Legros, P. Strizhak // *Energies*. – 2017. – V. 10. – № 3. – Article number 405.
116. Nyashina, G.S. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals / G.S. Nyashina, G. V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 172. – P. 1730–1738.
117. Zhang, Y. Flow behavior of high-temperature flue gas in the heat transfer chamber of a pilot-scale coal-water slurry combustion furnace / Y. Zhang, Y. Bo, Y. Wu, X. Wu, Z. Huang, J. Zhou, K. Cen // *Particuology*. – 2014. – V. 17. – P. 114–124.
118. Khodakov, G.S. Coal-water suspensions in power engineering / G.S. Khodakov // *Thermal Engineering*. – 2007. – V. 54. – № 1. – P. 36–47.
119. Osintsev, K. V. Studying flame combustion of coal-water slurries in the furnaces of power-generating boilers / K. V. Osintsev // *Thermal Engineering*. – 2012. – V. 59 – № 6. – P. 439–445.
120. Leckner, B. Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed / B. Leckner, L.E. Åmand, K. Lücke, J. Werther // *Fuel*. – 2004. – V. 83. – № 4–5. – P. 477–486.
121. Shahzad, K. Effect of Hydrodynamic Conditions on Emissions of NO_x, SO₂, and CO from Co-Combustion of Wheat Straw and Coal Under Fast Fluidized Bed Condition / K. Shahzad, M. Saleem, M. Kazmi, Z. Ali, S. Hussain, N.A. Akhtar // *Combustion Science and Technology*. – 2016. – V. 188. – № 8. – P. 1303–1318.
122. Няшина, Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.14.14 / Няшина Галина

- Сергеевна. – НИ ТПУ: Томск, 2018. – 201 с.
123. Мальцев, Л.И. Пневматическая форсунка. Патент на изобретение. / Л.И. Мальцев // Номер патент: 2106914. Страна: Россия. Номер заявки 96109546/25. МПК: 6В 05В 7/02 А.
 124. Кравченко, И.В. Устройство для сжигания водоугольного топлива. Патент на изобретение. / И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, Л.И. Мальцев, В.Е. Самборский // Номер патента: 2460014 Страна: Россия. Номер заявки 2009113840/06. МПК: F23К 1/02.
 125. Алексеенко, С.В. Технологическая линия для производства водоугольного топлива и его сжигания. Патент на полезную модель. / С.В. Алексеенко, Л.В. Карташова, И.В. Кравченко, Л.И. Мальцев, В.Е. Самборский // Номер патента: 87700. Страна: Россия. Номер заявки: 2009120319/22.
 126. Мальцев, Л.И. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлив / Л.И. Мальцев, И.В. Кравченко, А.И. Кравченко, В.Е. Самборский // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – № 1(6). – С. 25–30.
 127. Саломатов, В.В. Перевод котлов малой мощности на водоугольную технологию / В.В. Саломатов, У.В. Дорохова, С.В. Сыродой // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3–4. – С. 38–46.
 128. Пузырёв, Е.М. Технология сжигания водоугольного топлива в энергетических котлах / Е.М. Пузырёв, В.А. Голубев // Вестник алтайской науки. – 2014. – № 4 (22). – С. 325–331.
 129. Пузырев Е.М. Результаты опытно-промышленных испытаний работы мазутного котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе / Е.М. Пузырев, В.И. Мурко, В.Н. Звягин, В.И. Федяев, С.А. Бровченко, Д.А. Дзюба, И.Х. Нехороший, В.Н. Аглиулин // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 69–72.
 130. Осинцев, К.В. Разработка системы сжигания водоугольной суспензии / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 5–14.
 131. Testo 340. Анализатор дымовых газов. Инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. – 64 с. – Режим доступа:

https://www.gasdetecto.ru/files/330/testo-340_re.pdf.

132. Lior, N. Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future / N. Lior // *Energy*. – 2008. – V. 33. – № 6. – P. 842–857.
133. Takeshita, T. Potential contribution of coal to the future global energy system / T. Takeshita, K. Yamaji // *Environmental Economics and Policy Studies*. – 2006. – V. 8. – № 1. – P. 55–87.
134. Глушков, Д.О. Зажигание органоводоугольных топливных композиций / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 460 с.
135. Дмитриенко, М.А. Техничко-экономический анализ перспектив применения органоводоугольных топлив различных компонентных составов / М.А. Дмитриенко, П.А. Стрижак, Ю.С. Цыганкова // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2017. – № 3. – С. 38–44.
136. Glushkov, D.O. Variation of heating and ignition conditions for composite liquid fuel droplets on addition of dressed coal / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, K.Y. Vershinina // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – V. 13, № 1. – P. 71–80.
137. Шеремет, А.Д. Теория экономического анализа: учебник / А.Д. Шеремет – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Инфра-М, 2011. – 352 с.
138. Баканов, М.И. Теория экономического анализа: Учебник для студ.эконом.спец. / М.И. Баканов, М.В. Мельник, А.Д. Шеремет – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2007 – 536 с.
139. Coal Information. Luxembourg: International Energy Agency [Электронный ресурс]. – 2012. – 70 p. – Режим доступа: <https://www.iea.org>.
140. Литовкин, В.В. Техничко-экономические предпосылки применения водоугольного топлива в электроэнергетике / В.В. Литовкин // *Энергетика и электрификация*. – 2006. – № 7. – С. 20–22.
141. Горлов, Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов / Е. Г. Горлов // *Химия твердого топлива*. – 2004. – № 6. – С. 50–61.

142. Glushkov, D.O. Hot surface ignition of a composite fuel droplet / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, K.Y. Vershinina // MATEC Web of Conferences. – 2015. – V. 23. – Article number 01063.
143. Dmitrienko, M.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // Science of The Total Environment. – 2018. – V. 613–614. – P. 1117–1129.
144. Kurgankina, M.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Science of the Total Environment. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.
145. Zakharevich, Y.S. Technoeconomic prerequisites for use of water-coal-organic chemical slurry fuels in large power plants / Y.S. Zakharevich, P.A. Strizhak // Chemical and petroleum engineering. – 2017. – V. 53. – № 5–6. – P. 412–419.
146. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Томска до 2031 года (Актуализация на 2017 год). Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения. Приложение 1 [Электронный ресурс]. – 2016. – 95 с. – Режим доступа: <https://admin.tomsk.ru>.
147. Овчинников, Ю.В. Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, А.И. Цепенюк, А.В. Шихотинов, Е.В. Татарникова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2011. – № 1 (16). – С. 117–126.
148. Борзов, А.И. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств / А.И. Борзов, М.П. Баранова // Химия твердого топлива. – 2006. – № 4. – С. 40–45.
149. Вершинина, К.Ю. Отличия характеристик зажигания водоугольных суспензий и композиционного жидкого топлива / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Химия твердого топлива. – 2016. – № 2. – С. 21–33.

150. СТО 70238424.27.060.01.011-2009 Мельницы шаровые барабанные. Общие технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования [Электронный ресурс] – 2009. – 138 с. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200093653>
151. Kumar, A. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development / A. Kumar, B. Sah, A.R. Singh, Y. Deng, X. He, P. Kumar, R.C. Bansal // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 69. – P. 596–609.
152. Dmitrienko, M.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.
153. Dmitrienko, M.A. Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 177. – P. 284–301.
154. Nyashina, G.S. Environmental, economic and energetic benefits of using coal and oil processing waste instead of coal to produce the same amount of energy / G.S. Nyashina, M.A. Kurgankina, P.A. Strizhak // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – V. 174. – P. 175–187.
155. Kurgankina, M.A. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – P. 998–1008.
156. Афоничкин, А.И. Управленческие решения в экономических системах: Учебник для вузов / А.И. Афоничкин, Д.Г. Михаленко – СПб.: Питер, 2009. – 480 с.
157. Anwar, M. The efficacy of multiple-criteria design matrix for biodiesel feedstock selection / M. Anwar, M.G. Rasul, N. Ashwath // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 198. – Article number 111790.
158. Kim, I.Y. Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: A new method for Pareto front generation / I.Y. Kim, O.L. De Weck // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2006. – V. 31. – № 2. – P. 105–116.

159. Dmitrienko, M.A. Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *Science of the Total Environment*. – 2017. – V. 598. – P. 21–27.
160. Шевырев, С.А. Снижение концентраций антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов углепереработки в составе композиционных жидких топлив / С.А. Шевырев, М.А. Дмитриенко, А.Г. Косинцев // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2017. – № 8. – С. 48–54.
161. Дмитриенко, М.А. Антропогенные выбросы при сжигании ОБУТ на основе углей и продуктов угле- и нефтепереработки / М.А. Дмитриенко, А.Г. Косинцев, Г.С. Няшина, С.А. Лырщиков // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2018. – № 1. – С. 41–44.
162. Schnell, U. Experimental and Numerical Investigation of Noxformation and its Basic Interdependencies on Pulverized Coal Flame Characteristics / U. Schnell, M. Kaess, H. Brodbek // *Combustion Science and Technology*. – 1993. – V. 93. – № 1. – P. 91–109.
163. Van Der Lans, R.P. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners / R.P. Van Der Lans, P. Glarborg, K. Dam-Johansen // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1997. – V. 23. – № 4. – P. 349–377.
164. Hu, Y. CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases / Y. Hu, S. Naito, N. Kobayashi, M. Hasatani // *Fuel*. – 2000. – V. 79. – № 15. – P. 1925–1932.
165. Yang, J. Experimental study on NO_x reduction from staging combustion of high volatile pulverized coals. Part 2. Fuel staging / J. Yang, R. Sun, S. Sun, N. Zhao, N. Hao, H. Chen, Y. Wang, H. Guo, J. Meng // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – V. 138. – P. 445–454.
166. Dmitrienko, M.A. Experimental evaluation of main emissions during coal processing waste combustion / M.A. Dmitrienko, J.C. Legros, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 233. – P. 299–305.
167. Zhou, H. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char

- combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions / H. Zhou, Y. Li, N. Li, R. Qiu, K. Cen // *Journal of the Energy Institute*. – 2019. – V. 92. – № 2. – P. 351–363.
168. Zhang, Z. Development of Sulfur Release and Reaction Model for Computational Fluid Dynamics Modeling in Sub-Bituminous Coal Combustion / Z. Zhang, D. Chen, Z. Li, N. Cai, J. Imada // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 2. – P. 1383–1398.
 169. Baranova, M.P. Combustion of water and coal suspension fuels of low-metamorphized coals / M.P. Baranova, T.A. Kulagina, S. V. Lebedev // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2009. – V. 45. – № 9–10. – P. 554–557.
 170. Glushkov, D.O. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D.O. Glushkov, S.Y. Lyrshchikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 4. – P. 3441–3450.
 171. Valiullin, T.R. New approach to study the ignition processes of organic coal water fuels in an oxidizer flow / T.R. Valiullin, M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – V. 110. – Article number 01055.
 172. Valiullin, T.R. Ignition of the soaring droplet sets of waste-derived coal-water slurry with petrochemicals / T.R. Valiullin, M.A. Dmitrienko, S.A. Shevyrev, R.I. Egorov // *MATEC Web of Conferences*. – 2016. – V. 72. – Article number 01121.
 173. Рыжкин, В.Я. Тепловые электрические станции: Учебник для вузов под редакцией Гиршфельда В.Я. / В.Я. Рыжкин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.-Л.: Энергия, 1987. – 328 с.
 174. Курганкина, М.А. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции / М.А. Курганкина, К.Ю. Вершинина, И.П. Озерова, В.В. Медведев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 72–82.
 175. Strizhak, P.A. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals / P.A. Strizhak, K.Y. Vershinina // *Energy*. – 2017. – V. 120. – P.

34–46.

176. Karcher, M. Modelling dispersal of radioactive contaminants in Arctic waters as a result of potential recovery operations on the dumped submarine K-27 / M. Karcher, A. Hosseini, R. Schnur, F. Kauker, J.E. Brown, M. Dowdall, P. Strand // *Marine Pollution Bulletin*. – 2017. – V. 116. – № 1–2. – P. 385–394.
177. Quinn, C.L. A methodology for evaluating the influence of diets and intergenerational dietary transitions on historic and future human exposure to persistent organic pollutants in the Arctic / C.L. Quinn, J.M. Armitage, K. Breivik, F. Wania // *Environment International*. – 2012. – V. 49. – P. 83–91.
178. Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) [Электронный ресурс]. – New York: Cambridge University Press. – 2005. – Режим доступа: <https://acia.amap.no>.
179. Summary for Policy-makers: Arctic Pollution Issues [Электронный ресурс]. – Oslo: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – 2015. – Режим доступа: <https://oaarchive.arctic-council.org>.
180. Vershinina, K.Y. Ignition of coal suspensions based on water of different quality / K.Y. Vershinina, P.A. Strizhak // *Coke and Chemistry*. – 2016. – V. 59. – № 11. – P. 437–440.
181. Dmitrienko, M.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / M.A. Dmitrienko, G/S/ Nyashina, P. A. Strizhak // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** New approach to study the ignition processes of organic coal water fuels in an oxidizer flow / T.R. Valiullin, M.A. Dmitrienko (Kurgankina), P.A. Strizhak // **EPJ Web of Conferences**. – 2016. – V. 110. – Article number 01055.
2. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Ignition of the soaring droplet sets of waste-derived coal-water slurry with petrochemicals / T.R. Valiullin, M.A. Dmitrienko (Kurgankina), S.A. Shevyrev, R.I. Egorov // **MATEC Web of Conferences**. – 2016. – V. 72. – Article number 01121.
3. **Дмитриенко (Курганкина) М. А.** Снижение концентраций антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов углепереработки в составе композиционных жидких топлив / С.А. Шевырев, М.А. Дмитриенко (Курганкина), А.Г. Косинцев // **Безопасность жизнедеятельности**. – 2017. – № 8. – С. 48–54.
4. **Дмитриенко (Курганкина) М.А.** Техничко-экономический анализ перспектив применения органоводоугольных топлив различных компонентных составов / М.А. Дмитриенко (Курганкина), П.А. Стрижак, Ю.С. Цыганкова // **Химическое и нефтегазовое машиностроение**. – 2017. – № 3. – С. 38–44.
5. **Дмитриенко (Курганкина) М.А.** Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий / Г.С. Няшина, М.А. Дмитриенко (Курганкина), Н.Е. Шлегель, С.А. Шевырев // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики**. – 2017. – Т. 19, № 3-4. – С. 41-52.
6. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / M.A. Dmitrienko (Kurgankina), G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Journal of Hazardous Materials**. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.

7. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste / M.A. Dmitrienko (Kurgankina), P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2017. – V. 598. – P. 21–27.
8. **Дмитриенко (Курганкина) М.А.** Антропогенные выбросы при сжигании ОБУТ на основе углей и продуктов угле- и нефтепереработки / М.А. Дмитриенко (Курганкина), А.Г. Косинцев, Г.С. Няшина, С.А. Лырщиков // **Химическое и нефтегазовое машиностроение**. – 2018. – № 1. – С. 41–44.
9. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review / M.A. Dmitrienko (Kurgankina), P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2018. – V. 613–614. – P. 1117–1129.
10. **Курганкина М.А.** К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции / М.А. Курганкина, К.Ю. Вершинина, И.П. Озерова, В.В. Медведев // **Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов**. – 2018. – Т. 329, № 9. – С. 41–44.
11. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Experimental evaluation of main emissions during coal processing waste combustion / M.A. Dmitrienko (Kurgankina), J.C. Legros, P.A. Strizhak // **Environmental Pollution**. – 2018. – V. 233. – P. 299–305.
12. **Kurgankina M.A.** Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Journal of Cleaner Production**. – 2018. – V. 177. – P. 284–301.
13. **Kurgankina M.A.** Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal / G.S. Nyashina, K.Yu. Vershinina, M.A. Kurgankina, P.A. Strizhak // **Journal of Hazardous Materials**. – 2018. – V. 347. – P. 359–370.
14. **Kurgankina M.A.** Environmental, economic and energetic benefits of using coal and oil processing waste instead of coal to produce the same amount of energy / G.S. Nyashina, M.A. (Dmitrienko) Kurgankina, P.A. Strizhak // **Energy Conversion and Management**. – 2018. – V. 174. – P. 175–187.

15. **Kurgankina M.A.** Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.
16. **Kurgankina M.A.** Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Applied Thermal Engineering**. – 2019. – V. 147. – P. 998–1008.
17. **Kurgankina M.A.** Gas anthropogenic emissions during slurry fuels combustion / G.S. Nyashina, M.A. Kurgankina, M.R. Akhmetschin // **AIP Conference Proceedings**. 2019. – V. 2135. – Article number 020042.
18. **Курганкина М.А.** Анализ состава золы при сжигании перспективных водосодержащих суспензионных топлив / Г.С. Няшина, М.А. Курганкина, М.Р. Ахметшин, В.В. Медведев // **Кокс и химия**. – 2020. – №3. – С. 48-59.
19. **Kurgankina M. A.** Ecological assessment of industrial waste as a high-potential component of slurry fuels / M.A. Kurgankina (Dmitrienko), G. S. Nyashina, P. A. Strizhak // **Waste and Biomass Valorization**. – 2021. – V. 12, №3. – P. 1659–1676.

Список докладов на конференциях

1. **Дмитриенко (Курганкина) М.А.** Органоводоугольные топливные композиции для решения проблем загрязнения атмосферы тепловыми электрическими станциями и котельными / М.А. Дмитриенко, А.Г. Косинцев // Труды II Международной конференции «Рациональное природопользование: традиции и инновации». Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2017. – С. 199-202
2. **Дмитриенко (Курганкина) М.А.** Экспериментальная оценка выбросов CO₂ при сжигании отходов углепереработки / М.А. Дмитриенко, А.Г. Косинцев // Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Томск: НИ ТПУ, 2017. – С. 191–193.
3. **Курганкина М.А.** Экологические последствия сжигания суспензионных топлив на основе углей, отходов и продуктов их переработки / М.А. Курганкина, А.Г. Косинцев // Труды V Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы. Томск: НИ ТПУ, 2017. – С. 94–98.
4. **Курганкина М.А.** Преимущества и недостатки перевода угольных энергетических установок на органоводоугольные топлива / М.А. Курганкина, П.А. Стрижак // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-7). Москва: МЭИ, 2018. – С. 398–401.
5. **Курганкина М.А.** Особенности процессов зажигания и горения водомасляных эмульсий и органоводоугольных суспензий / М.А. Курганкина, Г.С. Няшина, П.А. Стрижак, К.Ю. Вершинина // Труды Всероссийской конференции «XXXIV Сибирский теплофизический семинар». Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2018. – С.77.
6. **Курганкина М.А.** Экологические преимущества композиционных топлив на основе отходов угле- и нефтепереработки с растительными добавками / Г.С. Няшина, М.А. Курганкина, К.Ю. Вершинина // Труды VII Международного

Российско-Казахстанского симпозиума "Углекислота и экология Кузбасса". Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. – С. 64

7. **Курганкина М.А.** Относительные экологические, энергетические и экономические показатели топливных композиций с биомассой / Г.С. Няшина, В.В. Дорохов, М.А. Курганкина, К.Ю. Вершинина // Труды XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2020.

Список проектов, в выполнении которых принимала участие

1. Проект РНФ № 15–19–10003 «Разработка основных элементов теории зажигания существенно неоднородных по структуре капель органоводоугольных топлив» (2015–2017 гг.).
2. Грант Президента РФ № МД-1221.2017.8 «Исследование изменений оптических свойств жидкости, приводящих к взрывному дроблению неоднородных капель в условиях высокотемпературного нагрева» (2017-2018 гг.).
3. Внутренний проект ТПУ ВИУ–ЭНИН–97/2017 «Экологически чистая энергетика». Проект в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности (2017 гг.).
4. Внутренний проект ТПУ ВИУ-ИШФВП-184-2018 «Фундаментальные основы безопасного и экологически эффективного сжигания композиционных топлив из отходов углеобогащения и нефтепереработки, сточных и технологических вод» (2018 г.).
5. Внутренний проект ТПУ ВИУ-ИШФВП-60/2019 «Микро-диспергирование интенсивно нагреваемых неоднородных капель в составе аэрозольных потоков как способ масштабного вторичного измельчения топливных эмульсий и суспензий» (2019 г.).
6. Грант Президента РФ № МД-314.2019.8 «Исследование энергетических и экологических характеристик физико-химических процессов при горении аэрозолей мультитопливных композиций из отходов с применением оптических методов» (2019–2020 гг.).
7. Грант Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение 075-15-2020-806 (контракт 13.1902.21.0014).

Список наград и достижений

1. Стипендия Президента Российской Федерации аспирантам, осваивающим образовательные программы высшего образования в организациях, осуществляющих образовательную деятельность, находящихся в ведении Министерства Образования и науки Российской Федерации, на 2017/18 учебный год.
2. Стипендия Президента Российской Федерации студентам и аспирантам организаций, осуществляющих образовательную деятельность, обучающимся по образовательным программам высшего образования по очной форме по специальности или направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики на 2018/19 учебный год.
3. Стипендия Президента Российской Федерации студентам и аспирантам, обучающимся по образовательным программам высшего образования, имеющим государственную аккредитацию, по очной форме обучения по специальностям или направлениям подготовки, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики, на 2019/20 учебный год.

Список актов об использовании результатов

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Сердцев В.Н.
Дата "17" мая 2020 г.


ОАО «БЕЛОВСКОЕ ЭНЕРГОУПРАВЛЕНИЕ»

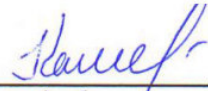
А К Т

о практическом использовании результатов
диссертационной работы
Курганкиной Маргариты Александровны

В результате рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы Курганкиной М.А. «Технико-экономический анализ характеристик сжигания композиционных жидких топлив из отходов нефтепереработки и углеобогащения на ТЭС», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, комиссией в составе: Каменского Д.Е. – главный инженер, Морозова В.П. – начальник электротехнической лаборатории, был составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

1. результаты диссертационной работы Курганкиной М.А. признаны актуальными, полезными с практической точки зрения развития современных представлений о процессах горения композиционных жидких топлив (КЖТ) из отходов углеобогащения в камерах сгорания ТЭС;
2. полученные результаты технико-экономического анализа использовались при выборе оптимальных (с точки зрения наиболее важных основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) режимом работы энергоблоков, имеющих в распоряжении ОАО «Беловское энергоуправление»;
3. сформулированные в диссертационной работе выводы использованы в виде практических рекомендаций соответствующим подразделениям ОАО «Беловское энергоуправление» с целью улучшения технологий сжигания КЖТ различного состава и снижения негативного влияния ТЭС на окружающую среду.

Члены комиссии:




Д.Е.Каменский
В.П. Морозов



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИШЭ НИ ТПУ

К.т.н., доцент

Матвеев А.С.

“ 22 ” мая 2020 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы

Курганкиной Маргариты Александровны

«Технико-экономический анализ характеристик сжигания композиционных жидких топлив из отходов нефтепереработки и углеобогащения на ТЭС» 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 и теоретических 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 на объектах большой и малой теплоэнергетики. Особый интерес, по мнению сотрудников НОЦ И.Н. Бутакова, представляют результаты исследований экологических характеристик горения сложных по составу композиционных топлив в камерах сгорания водогрейных и паровых котельных агрегатов.

Разработанная экономическая модель и произведенный технико-экономический анализ позволили установить, что суспензии на основе отходов угле- и нефтепереработки существенно выгоднее с точки зрения экономики (экономия затрат от сотен млн. до десятков млрд. руб. в год) по сравнению с углями даже самого высокого сорта. При этом в зависимости от приоритетов и требований по антропогенным выбросам, стоимости топлива и энергетическим характеристикам можно варьировать концентрацию и тип компонентов КЖТ.

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 концентрации компонентов топливных суспензий на экологические характеристики горения;
- экономическая модель для сравнения различных составов ОВУТ по показателям эффективности смеси: наименьшая стоимость ОВУТ при наибольшей теплоте сгорания, минимальное время зажигания, максимальная длительность горения, доступность компонента в регионе и пр;
- результаты технико-экономический анализ перехода ТЭС и котельной с традиционного топлива на органоводоугольные топливные композиции на основе воды, угля, отходов углеобогащения, продуктов нефтепереработки.

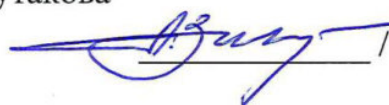
Применение полученных в диссертационной работе результатов и сформулированных рекомендаций позволяет: использовать многочисленные отходы угле- в качестве компонентов для приготовления композиционных топлив; повысить как эффективность их сжигания в топках паровых и водогрейных котлов, так и надежность 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

21.05.2020

 / Заворин А.С.