

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2021

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

**Научный руководитель:**

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

**Официальные оппоненты:**

**Щинников Павел Александрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск), кафедра тепловых электрических станций, профессор.

**Шторк Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), лаборатория экологических проблем теплоэнергетики, заведующий лабораторией

Защита состоится «10» июня 2021 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.20 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Высокоморная Ольга Валерьевна  
кандидат физико-математических наук



## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Несмотря на активное использование газа, нефти и урана, доля угля в мировом производстве энергии высока и составляет около 38 %, а в ряде стран значительно больше, например, в Китае – 78 %, в Индии – 58 %. В России эта доля составляет в среднем около 19 %, в Японии – 25 %, в США – 35 %. Согласно данным Международного энергетического агентства установленная мощность угольных ТЭС по всему миру на 2017 год составила около 1.5 ТВт. При этом лидерами по данным показателям являются индустриально развитые и развивающиеся страны, такие как Китай, США, Индия, Южная Африка, Россия (рис. 1).



Рис. 1. Установленные мощности (МВт) угольных тепловых электростанций по всему миру (на основе данных Key World Energy Statistics. International Energy Agency, 2019; World energy resources. World Energy Council, 2016).

Так как экономический рост не возможен без увеличения мощностей энергетического сектора, то спрос на тепловую и электрическую энергию будет и дальше повышаться. Природный газ менее конкурентоспособен по сравнению с углем из-за его высокой стоимости, а также сложностей при транспортировке. Несмотря на это доля газовых ТЭС будет расти, но прогнозируется ежегодное снижение темпов. Увеличение мощностей атомных электрических станций не предвидится. В связи с катастрофой на Фукусиме (2011 г.) и ряда других чрезвычайных ситуаций правительства многих стран (особенно Европы) отказались от дальнейшего развития атомной энергетики. В этой связи уголь остается главным энергоисточником, который может удовлетворить существенно возросший спрос на энергию, не покрываемый другими доступными источниками.

В течение последних десяти лет темпы по объемам сжигаемого угля являлись самыми быстрорастущими среди всех источников энергии. В период с 2004 по 2014 годы мировое потребление угля возросло с 5.8 до 7.9 млн. тонн, соответственно (более чем на 35 %). Наряду с ежегодным ростом потребления угля происходит накопление отходов углепереработки (промпродукт, шлам, фильтр-кек). На сегодняшний день объем таких отходов составляет сотни миллионов тонн в год (в среднем на одной обогатительной фабрике образуется несколько тысяч тонн в неделю). Наряду с отходами углепереработки также требуют утилизации отходы нефтяного

происхождения: отложения, образующиеся при очистке нефтепроводов и резервуаров, отработанные масла различных энергоустановок, турбин, двигателей, трансформаторов. Согласно данным, опубликованным в 2014–2020 гг. в международных журналах (Fuel, Energy и др.), в мире уже накоплено более 1 млрд. тонн нефтешламов, ежегодно образуется около 60 млн. тонн.

Утилизация перечисленных отходов является одной из ключевых задач как для отдельных регионов, так и для большой группы государств, имеющих развитую экономику. Возможность расширения площадей складирования отходов угле- и нефтепереработки достаточно ограничена. С учетом объемов накопленных отходов и увеличением темпа прироста новых, а также негативного влияния на окружающую среду проблема их масштабной утилизации приобретает все большую значимость. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является вовлечение отходов углеобогащения (в частности, фильтр-кеков), а также отходов нефтяного происхождения в энергетический сектор в качестве компонентов водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив. В целом такой вид топлив принято называть композиционными жидкими (КЖТ).

За последние 50 лет разработаны фундаментальные основы группы технологий промышленного приготовления и сжигания КЖТ в топках энергетических котлоагрегатов, созданы физические и 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., Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Ануфриев И.В., Щенников П.А., 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, промышленные 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., Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Ануфриев И.В., Щинников П.А., Чернецкий М.Ю., Богомоллов А.Р., Шевырев С.А., Стрижак П.А., Глушков Д.О., Вершинина К.Ю., Валиуллин Т.Р., Няшина Г.С., Шабардин Д.П.

Также предпринимались попытки проведения технико-экономических расчетов, основанных на реальных проектах модернизации функционирующих энергетических объектов. Следует выделить труды исследователей Овчинникова Ю.В., Бойко Е.Е. и Луценко С.В. В частности, известен перевод газомазутной котельной 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. Разработаны способы производства и сжигания топлива, а также 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 высокой коммерческой привлекательности проекта: срок окупаемости составил 1.82 года, индекс дохода 3.26. 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.

Хорошо известен практический опыт сжигания КЖТ в промышленных масштабах. Можно отметить такие страны, как Китай и Япония, наиболее активно использующие КЖТ в энергетике. Например, в Японии в течение последних лет сжигается примерно 800 тыс. тонн ВУТ в год. В Китае потребление КЖТ возросло с 2 млн. тонн в 2001 г. до 15 млн. тонн в 2006 г. В 2020 г. производство КЖТ в Китае увеличилось до 100 млн. тонн в год.

Опыт перевода энергетических установок на сжигание КЖТ в России не так масштабен и успешен. В 1989 году построен опытно-промышленный углепровод «Белово – Новосибирск» (протяженность 262 км, расчетная пропускная способность 3 млн. тонн ВУТ в год, приемный терминал на Новосибирской ТЭЦ-5). За период с 1989 г. по 1997 г. по трубопроводу доставлено на Новосибирскую ТЭЦ-5 около 350 тыс. м<sup>3</sup> ВУТ. В 1997 г. в период профилактики Новосибирской ТЭЦ-5 трубопровод остановлен и не функционирует по настоящее время. Причин приостановления работы трубопровода было несколько. Одной из определяющих выступило замерзание ВУТ и возросшие затраты на транспортировку топлива. Также проведена опытная эксплуатация котлов при сжигании КЖТ на основе фильтр-кеков каменных углей на станции Барзас, Кемеровская область.

Перспективы дальнейшего развития использования композиционных жидких топлив в энергетическом секторе весьма обширны. Появится возможность сделать важный шаг, позволяющий не только эффективно 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. Значительный интерес для развития теплоэнергетики представляет проведение комплексного технико-экономического обоснования использования КЖТ с учетом энергетических, технико-экономических и экологических характеристик.

**Целью настоящей 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  $\text{NO}_x$  и серы  $\text{SO}_x$ ) 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 угольных топлив, отличающийся от известных учетом наиболее значимых энергетических, экологических и технико-экономических характеристик используемых топлив. Проведено преобразование типичных схем систем топливных хозяйств ТЭС, работающих на угле, мазуте и газе, 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 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 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. Результаты диссертационных исследований

используются при выполнении инвестиционного проекта, направленного на создание первого в России опытно-промышленного участка подготовки и сжигания органоводугольного 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, а также сравнением с результатами других авторов.

**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), гранта Президента РФ (проект № МД-314.2019.8), а также гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение 075-15-2020-806 (контракт 13.1902.21.0014). 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»), так как применение КЖТ вместо угля позволяет существенно снизить антропогенные выбросы, эффективно утилизировать многочисленные промышленные 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 формулировании 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 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) и др.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 181 наименование, содержит 26 рисунков, 40 таблиц, 182 страницы.

**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. Определены основные достижения в области исследований КЖТ, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий КЖТ.

**Во второй главе** приведено описание использованного в диссертационном исследовании стенда и разработанных методик регистрации концентраций  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  при сжигании угля и КЖТ на базе отходов углеобогащения (фильтр-кеков пяти распространенных как в России, так и за рубежом марок угля: «Г», «Д», «К», «СС», «Т») и горючих жидкостей (мазута, отработанного турбинного масла). На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие снижение выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  при сжигании КЖТ по сравнению с углем.

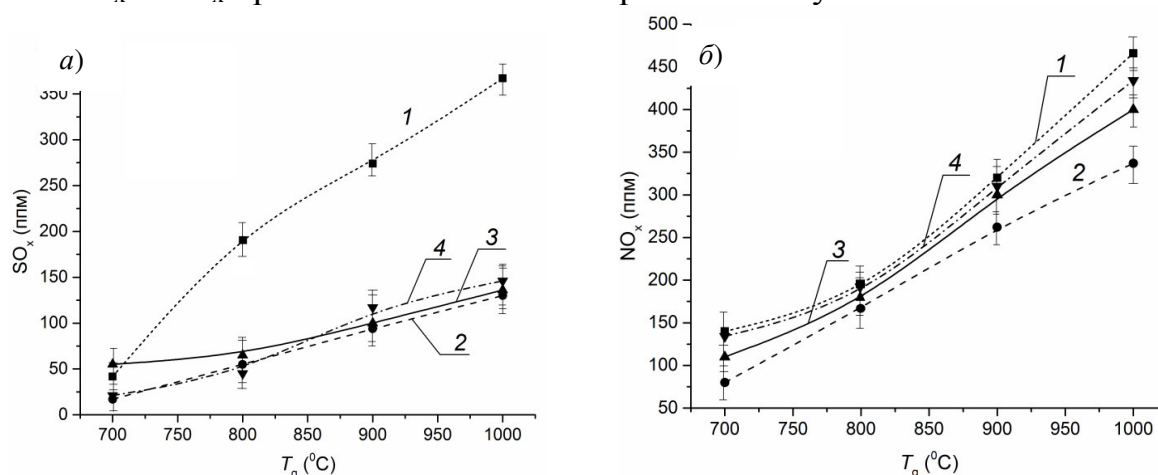


Рис. 2. Экспериментальные зависимости концентраций  $\text{SO}_x$  (а) и  $\text{NO}_x$  (б) от температуры в камере сгорания при сжигании угля и КЖТ на основе фильтр-кека и продуктов нефтепереработки: 1 – каменный уголь марки «К»; 2 – КЖТ на основе фильтр-кека «К»; 3 – КЖТ на основе фильтр-кека «К» 90 % и отработанного турбинного масла 10 %; 4 – КЖТ на основе фильтр-кека «К» 90 % и мазута 10 %

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.

Все перечисленные методики входили в разработанный автором новый подход оценки эффективности топлив ТЭС, ставший *первым защищаемым положением*.

Выполнено преобразование типичных схем систем топливных хозяйств котельной и ТЭС, работающих на твердом (уголь), жидком (мазут) и газовом (природный газ) топливах для использования КЖТ (рис. 3–6).

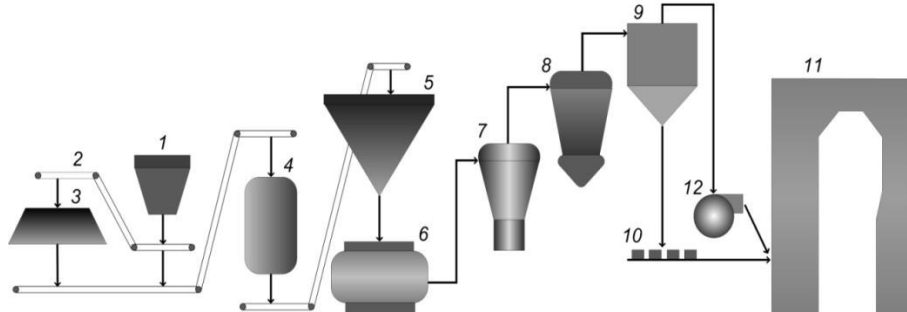


Рис. 3. Технологическая схема угольного хозяйства ТЭС: 1 – приемный бункер; 2 – ленточный транспортер; 3 – склад угля; 4 – дробильная установка; 5 – бункер сырого угля; 6 – пылеугольная мельница; 7 – сепаратор; 8 – циклон; 9 – бункер угольной пыли; 10 – питатель угля; 11 – паровой котел; 12 – мельничный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

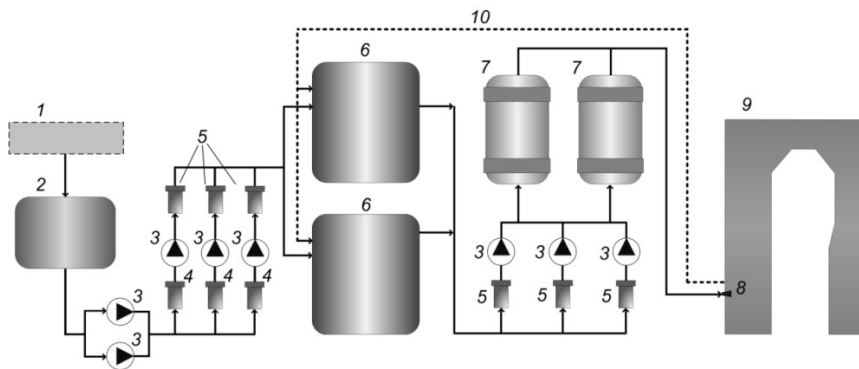


Рис. 4. Технологическая схема мазутного хозяйства (с наземным мазутохранилищем) ТЭС: 1 – приемное устройство; 2 – приемная емкость; 3 – насос; 4 – фильтр грубой очистки; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – мазутохранилище; 7 – подогреватель; 8 – форсунка; 9 – паровой котел; 10 – линия рециркуляции

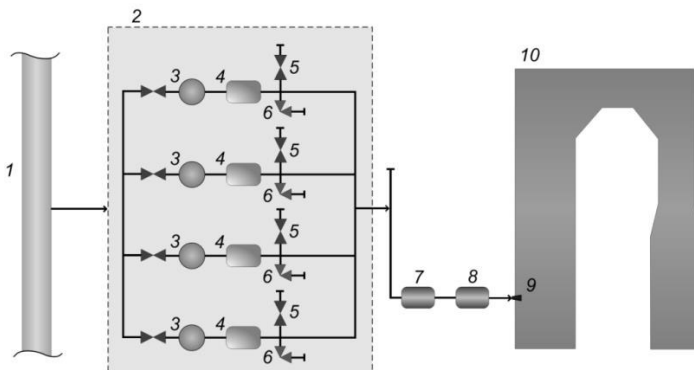
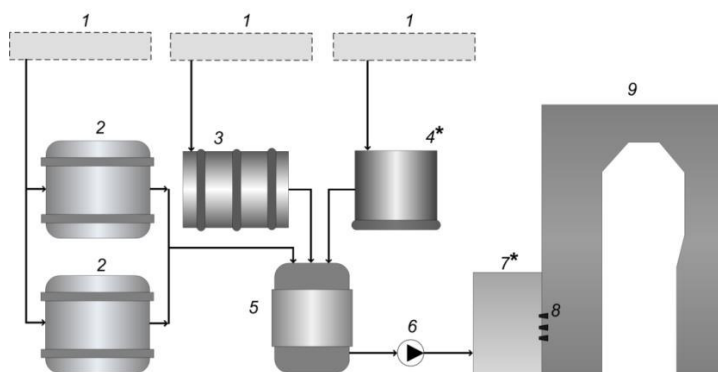


Рис. 5. Технологическая схема газового хозяйства ТЭС: 1 – магистральный газопровод; 2 – газораспределительный пункт; 3 – фильтр; 4 – регулятор давления; 5 – свеча для продувки газопровода; 6 – предохранительный клапан; 7 – отсечной клапан; 8 – регулирующий клапан; 9 – горелка; 10 – паровой котел

Рис. 6. 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 для КЖТ с гомогенизатором; 6 – насос; 7\* – предтопок; 8 – форсунка; 9 – паровой котел; \* – по требованию



Переход от традиционного топлива на суспензии существенно упрощает системы топливных хозяйств ТЭС и котельных. В частности, исключается необходимость в оборудовании, предназначенном для хранения, измельчения и транспортировки угля, а также в оборудовании газового и частично мазутного хозяйства.

На основе данных о количестве котлов на каждой из рассматриваемых станций (в частности, на станции № 1 имеются 10 паровых котлов) и организации топливных систем вычислены затраты на существующие топливные системы. При расчете затрат на топливные системы для КЖТ учитывалось уже имеющееся оборудование на станциях и его возможное дальнейшее использование при функционировании новых систем для КЖТ. Далее определена денежная экономия на системе топливного хозяйства при переходе на суспензии. Результаты расчетов представлены в таблице 1 (с учетом средних рыночных цен в 2016–2018 гг.).

Таблица 1. Сравнение расходов на оборудование системы топливного хозяйства Станции №1

| 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             |
| 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 для хранения КЖТ с гомогенизатором                 | 10 | 3000 | 30000  |
| Предтопок*                                                   | 10 | 1500 | 15000  |
| Устройство подачи топлива (форсунки, насос, трубопровод)     | 10 | 3500 | 35000  |
| Итого                                                        |    |      | 93200  |
| Экономия при переходе на КЖТ                                 |    |      | 743733 |

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

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 использования КЖТ с учетом группы ключевых параметров (теплота сгорания, расход топлива, антропогенные выбросы, зольный остаток, максимальная температура горения, минимальные температуры зажигания, времена задержки инициирования горения, экономические затраты, пожаровзрывобезопасность):  $I_{\text{отн}} = [\gamma_1 \cdot Q_{\text{отн}}] + [\gamma_2 \cdot G_{\text{отн}}] + [\gamma_3 \cdot A_{\text{NOx отн}} \cdot A_{\text{SOx отн}}] + [\gamma_4 \cdot M_{\text{отн}}] + [\gamma_5 \cdot P_{\text{отн}}] + [\gamma_6 \cdot S_{\text{отн}}] + [\gamma_7 \cdot N_{\text{отн}}]$ , где  $\gamma_i$  – 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). В таблице 2 приведены типичные значения концентраций основных компонентов исследованных суспензий.

Таблица 2. Типичные концентрации компонентов в КЖТ, принятые для дальнейших расчетов

| 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     |
| Газовый каменный уголь 50%, вода 49%, пластификатор 1%                                              | КЖТ 1       |
| 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       |
| Фильтр-кек газового каменного угля 89%, мазут 10%, пластификатор 1%                                 | КЖТ 5       |
| Фильтр-кек газового каменного угля 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1%          | КЖТ 6       |
| Фильтр-кек газового каменного угля 89%, отработанное моторное масло 10%, пластификатор 1%           | КЖТ 7       |
| Фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, мазут 10%, пластификатор 1%                        | КЖТ 8       |
| Фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, отработанное турбинное масло 10%, пластификатор 1% | КЖТ 9       |
| Фильтр-кек слабоспекающегося каменного угля 89%, отработанное моторное масло 10%, пластификатор 1%  | КЖТ 10      |

Относительный показатель по теплоте сгорания КЖТ в сравнении с углем (рис. 7, а):  $Q_{\text{отн}} = Q_{\text{КЖТ}} / Q_{\text{уголь}}$ .

Относительный показатель по массе топлива КЖТ, необходимой для получения 20 МДж энергии, в сравнении с углем (рис. 7, б):  $G_{\text{отн}} = G_{\text{КЖТ}} / G_{\text{уголь}}$ .

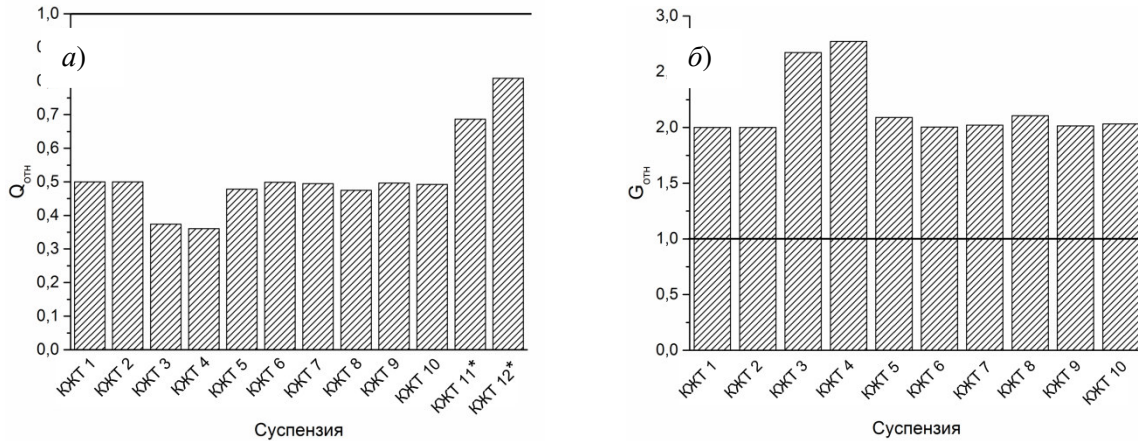


Рис. 7. Значения относительного показателя по теплоте сгорания КЖТ в сравнении с углем  $Q_{\text{отн}}$  (а); значения относительного показателя по массе КЖТ в сравнении с углем  $G_{\text{отн}}$  (б) для получения идентичного количества энергии

\* Для КЖТ можно получить близкие углям теплоты сгорания.  $Q_{\text{отн}}$  для КЖТ 11, 12 рассчитаны при условии максимально возможной концентрации горючего компонента в составе суспензии.

Относительные показатели по выбросам  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  от сжигания КЖТ по сравнению с углем (табл. 3, 4):  $A_{\text{NO}_x \text{ отн}} = \text{NO}_x \text{ КЖТ} / \text{NO}_x \text{ уголь}$ ;  $A_{\text{SO}_x \text{ отн}} = \text{SO}_x \text{ КЖТ} / \text{SO}_x \text{ уголь}$ .

Таблица 4. Значения  $A_{\text{NO}_x \text{ отн}}$  по выбросам  $\text{NO}_x$

| Суспензия | Температура сжигания, °С |       |       |       |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|
|           | 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 5. Значения  $A_{\text{SO}_x \text{ отн}}$  по выбросам  $\text{SO}_x$

| Суспензия | Температура сжигания, °С |       |       |       |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|
|           | 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   |

Относительный показатель по массе золы от сжигания КЖТ в сравнении с углем (рис. 8):  $M_{\text{отн}} = M_{\text{КЖТ}} / M_{\text{уголь}}$ .

Относительный показатель по максимальной температуре горения КЖТ в сравнении с углем (рис. 9):  $T_{\text{d отн}}^{\text{max}} = T_{\text{d КЖТ}}^{\text{max}} / T_{\text{d уголь}}^{\text{max}}$ .

Относительный показатель по минимальной температуре и времени задержки зажигания КЖТ в сравнении с углем (рис. 10, табл. 5):  $T_{\text{g отн}}^{\text{min}} = T_{\text{g КЖТ}}^{\text{min}} / T_{\text{g уголь}}^{\text{min}}$ ;  $\tau_{\text{d отн}} = \tau_{\text{d КЖТ}} / \tau_{\text{d уголь}}$ .



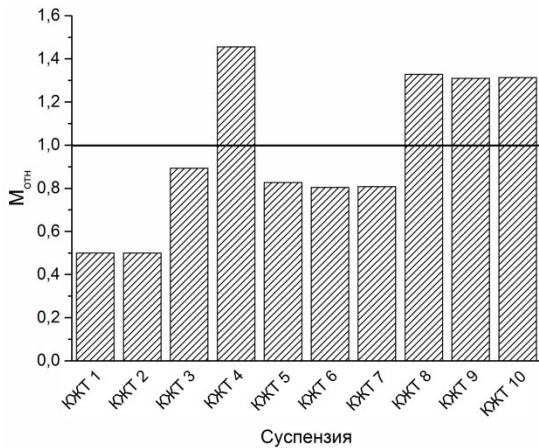


Рис. 8. Значения относительного показателя по массе зольного остатка КЖТ в сравнении с углем  $M_{отн}$

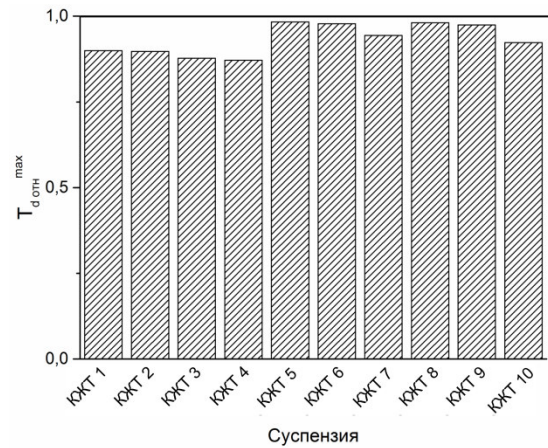


Рис. 9. Значения относительного показателя по максимальной температуре горения КЖТ в сравнении с углем  $T_{d\ отн}^{max}$

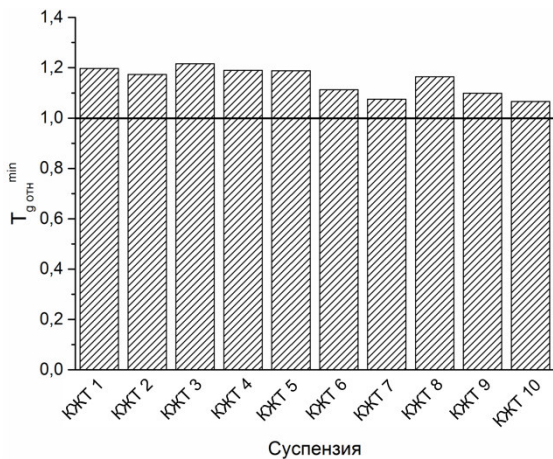


Рис. 10. Значения относительного показателя по минимальной температуре зажигания суспензий  $T_{g\ отн}^{min}$  в сравнении с углем

Таблица 5. Значения относительного коэффициента  $\tau_{d\ отн}$  по времени задержки зажигания КЖТ в сравнении с углем

| Суспензия | Температура сжигания, °C |       |       |       |       |
|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
|           | 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 |

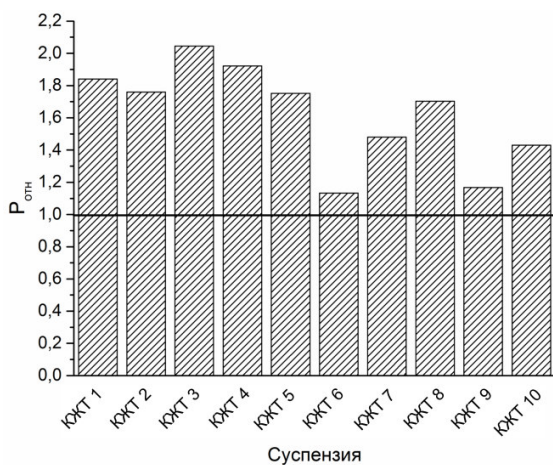


Рис.11. Значения относительного показателя пожаровзрывобезопасности КЖТ  $P_{отн}$  в сравнении с углем

Относительный показатель пожаровзрывобезопасности КЖТ (рис. 11) можно оценить с использованием трех указанных индикаторов по формуле:

$$P_{отн} = T_{g\ отн}^{min} \cdot \tau_{d\ отн} \cdot T_{d\ отн}^{max}.$$

Относительные показатели по стоимости топлива и затратам на хранение, транспортировку и сжигание КЖТ (рис. 12):  $S_{отн} = S_{КЖТ} / S_{уголь}$ ;  $N_{отн} = N_{КЖТ} / N_{уголь}$ .



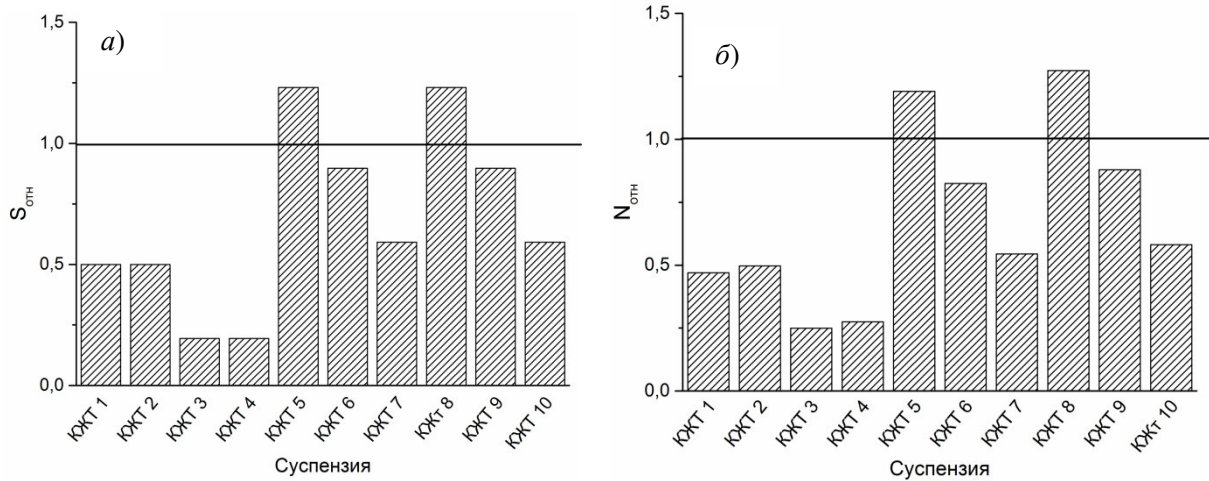


Рис.12. Значения относительных показателей по стоимости КЖТ  $S_{отн}$  (а) и затратам на хранение, транспортировку и сжигание КЖТ  $N_{отн}$  (б) в сравнении с углем

В таблице 6 представлены вычисленные значения комплексного безразмерного параметра  $I_{отн}$  для рассмотренных суспензий при весовых коэффициентах от 0 до 1. Рассчитанные значения  $I_{отн}$  соответствуют большому диапазону: 5.7–8.8. Как следствие, появляются широкие возможности варьирования свойств топливных композиций и характеристик энергетических процессов.

Таблица 6. Значения комплексного безразмерного критерия для исследованных КЖТ в сравнении с углями соответствующих марок

| Образец топлива | $I_{отн}$              |                                       |                                                           |                                                           |
|-----------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                 | $\gamma_1, \gamma_2=1$ | $\gamma_1=1, \gamma_2.. \gamma_7=0.5$ | $\gamma_3=1, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_4.. \gamma_7=0.5$ | $\gamma_5, \gamma_6=1, \gamma_1.. \gamma_4, \gamma_7=0.5$ |
| КЖТ 1           | 5.846                  | 3.173                                 | 2.941                                                     | 4.093                                                     |
| КЖТ 2           | 5.787                  | 3.143                                 | 2.908                                                     | 4.023                                                     |
| КЖТ 3           | 6.489                  | 3.432                                 | 3.275                                                     | 4.364                                                     |
| КЖТ 4           | 7.013                  | 3.687                                 | 3.523                                                     | 4.565                                                     |
| КЖТ 5           | 8.283                  | 4.381                                 | 4.499                                                     | 5.633                                                     |
| КЖТ 6           | 6.838                  | 3.668                                 | 3.757                                                     | 4.434                                                     |
| КЖТ 7           | 6.235                  | 3.365                                 | 3.265                                                     | 4.154                                                     |
| КЖТ 8           | 8.866                  | 4.67                                  | 4.808                                                     | 5.9                                                       |
| КЖТ 9           | 7.667                  | 4.082                                 | 4.284                                                     | 4.866                                                     |
| КЖТ 10          | 6.654                  | 3.573                                 | 3.434                                                     | 4.338                                                     |

Для развития третьего защищаемого положения диссертации вычислены 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 (табл. 7).

На основании имеющихся данных о виде топлива, используемого на станции, его энергетических характеристиках, расходе и стоимости проведена оценка экономического эффекта при переходе рассматриваемых объектов энергетики с традиционного топлива на КЖТ.

Таблица 7. Характеристики тепловых электрических станций и котельной

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

В расчетах учтены следующие статьи расходов: затраты, связанные с приобретением компонентов КЖТ; затраты на хранение топлива; затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов (ЗШО); затраты на экологические мероприятия, затраты на оборудование системы топливного хозяйства.

*Топливные затраты* рассчитывались в соответствии со средней рыночной стоимостью компонентов КЖТ (с учетом предполагаемых затрат на их транспортировку). Выражение для расчета топливных затрат:  $S_1 = C_T \cdot V_T$ ,

где  $C_T$  – среднерыночная цена топлива, руб./т;  $V_T$  – объем сжигаемого топлива, тонн.

*Эксплуатационные затраты* – затраты на электроэнергию для приготовления угольной пыли и КЖТ (на основе данных о расходе и стоимости электрической энергии):  $S_2 = G_3 \cdot C_3$ , где  $G_3$  – расход электроэнергии на пылеприготовление и на приготовление КЖТ, кВт·ч/год;  $C_3$  – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч.

*Затраты на хранение топлива с учетом необходимого резерва* рассчитаны на основе данных о необходимом резерве топлива, существующих складах и резервуарах на ТЭС. Также учитывалось дополнительное оборудование, необходимое для хранения КЖТ.

*Затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов.* Переход на КЖТ не приведет к значительному увеличению ЗШО. Поэтому дополнительных затрат не требуется.

*Затраты на экологические мероприятия или уплату штрафов.* Согласно проведенным экспериментальным исследованиям суспензионное топливо снижают концентрации  $SO_x$  и  $NO_x$ , а также летучей золы, следовательно, дополнительных затрат не требуется.

*Затраты на оборудование системы топливного хозяйства* – рассчитаны на основе средней рыночной стоимости оборудования, входящего в существующую систему топливного хозяйства ТЭС.

В таблице 8 представлены вычисленные затраты для станции № 1.

Таблица 8. Денежные потоки при переходе станции № 1 на КЖТ

| Перечень затрат,<br>млн. руб. | Фактическое топливо | КЖТ № 1 | КЖТ № 2 | КЖТ № 3 |
|-------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| Топливные затраты             | 5878.6              | 762.1   | 844.7   | 3088.5  |
| Затраты на подготовку:        |                     |         |         |         |
| Капитальные                   | –                   | –       | –       | –       |
| Эксплуатационные              | 45.9                | 13.3    | 13.1    | 12.9    |

Продолжение таблицы 8

| Перечень затрат,<br>млн. руб.                           | Фактическое топливо | КЖТ № 1 | КЖТ № 2 | КЖТ № 3 |
|---------------------------------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| Затраты на ЗШО                                          | –                   | –       | –       | –       |
| Затраты на экологические мероприятия                    | –                   | –       | –       | –       |
| Затраты на оборудование системы<br>топливного хозяйства | 841.7               | 93.2    | 93.2    | 93.2    |
| Итоговые затраты                                        | 6766.2              | 873.3   | 955.7   | 3199.3  |
| Экономия                                                | –                   | 5892.9  | 5810.5  | 3566.9  |

Выполненные оценки показали, что экономия затрат при использовании КЖТ в качестве топлива составляет от сотен млн. до десятков млрд. руб. в год. Следует отметить, что 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.

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 состава КЖТ основывалась на пяти принципах: минимизация стоимости суспензионной композиции; максимизация теплоты сгорания; максимизация длительности процесса горения; минимизация времени задержки зажигания (инерционности начальной стадии горения); минимизация выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ .

С целью определения оптимального компонентного состава топливных суспензий разработана экономическая модель, которая позволяет при заданных характеристиках отдельных компонентов смеси выбирать наиболее эффективный (с точки зрения основных энергетических и экономических характеристик) состав КЖТ (вид и концентрации основных компонентов). 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. Можно предположить, что наиболее эффективным топливом выступает КЖТ, в состав которого входят компоненты с оптимальным 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.). Компоненты с максимальным интегральным показателем «теплота сгорания/стоимость» (МДж/руб) выбирались в

состав оптимальной суспензии. Информация о стоимости и теплоте сгорания отдельных компонентов топлива принималась как среднее значение данных, представленных в табл.9. После фиксации состава КЖТ определялась доля каждого компонента в смеси. Наиболее эффективный компонент включался в смесь в пределах максимально допустимой относительной концентрации (из диапазона табл. 9). Второй по эффективности компонент включался в смесь с соблюдением условия: 100 % – максимальное содержание первого компонента – минимальное содержание третьего компонента – минимальное содержание четвертого компонента. Третий компонент включался в смесь с соблюдением условия: 100 % – максимальное содержание первого компонента – рассчитанное содержание второго компонента – минимальное содержание четвертого компонента. Содержание последнего по эффективности компонента: 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  $S_{\text{КЖТ}}$  и теплота сгорания  $Q_{\text{КЖТ}}$  полученной оптимальной смеси КЖТ с учетом данных о стоимости  $S_i$ , теплоте сгорания  $Q_i$  и концентрации  $\gamma_i$  каждого компонента и «эффективных» (осредняющих) соотношений:  $S_{\text{КЖТ}} = \sum S_i \cdot \gamma_i$ ;  $Q_{\text{КЖТ}} = \sum Q_i \cdot \gamma_i$ , где  $i=1..n$  – количество компонентов в КЖТ ( $n=4$ ).

Таблица 9. Основные характеристики компонентов КЖТ

| Компонент КЖТ      | Вид                                                         | Критерии выбора              |                                    |                                                                                                 |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                             | Стоимость ( $S_i$ ), руб./кг | Теплота сгорания ( $Q_i$ ), МДж/кг | Диапазон изменения относительной массовой концентрации в топливной композиции ( $\gamma_i$ ), % |
| 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                              |                                                                                                 |
| Жидкое горючее     | Мазут                                                       | 11–27                        | 39–41                              | 0–20                                                                                            |
|                    | 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                              |                                                                                                 |
|                    | Водонефтяная эмульсия                                       |                              | 44–46                              |                                                                                                 |
|                    | Нефтяные шламы                                              | 17                           | 13–21                              |                                                                                                 |
|                    | Нефтяные отложения                                          | 0.7                          | 41–43                              |                                                                                                 |
|                    | Фусы                                                        | 0.4                          | 32–48                              |                                                                                                 |
| 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                       | –                                  |                                                                                                 |

В таблице 10 представлены результаты проведенного технико-экономического обоснования, полученные с использованием разработанной модели.

Таблица 10. Результаты технико-экономического обоснования с выделенными приоритетами

| 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%                       | Технологическое или сточные воды | 0.3                   | 21.1                         | 75.7                                                          | 2                                                                  | 13                                                                 | 7                                                                     |
| 49.5%                       | Фильтр-кеки каменных углей       |                       |                              |                                                               |                                                                    |                                                                    |                                                                       |
| 10.0%                       | Нефтяные отложения               |                       |                              |                                                               |                                                                    |                                                                    |                                                                       |
| 0.5%                        | ЩКПК                             |                       |                              |                                                               |                                                                    |                                                                    |                                                                       |
| 40.0%                       | Технологическое или сточные воды |                       |                              |                                                               |                                                                    |                                                                    |                                                                       |

В рамках исследования проведены расчеты для десятков составов КЖТ. Для сравнения приведены первые два «лидера» по приоритетной эффективности состава КЖТ, добавлены полученные экспериментальные данные о приоритетах длительности горения и времени задержки зажигания КЖТ. На основании данных табл. 11 можно осуществлять выбор наиболее подходящего состава КЖТ с учетом стоимости полученной суспензии, ее теплоты сгорания, длительности горения и времени задержки зажигания.

Таким образом, КЖТ представляют универсальный вид топлива для получения требуемых экологических, энергетических и технико-экономических характеристик. По всему миру средние объемы выбросов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  энергетическим сектором составляют 7500 тонн в день и 4900 тонн в день соответственно (рис. 12). Применяя КЖТ в качестве топлива на объектах энергетики можно добиться сокращения данных выбросов на 20–40 %. Кроме того сократить основные затраты и обеспечить высокие энергетические параметры работы всего котельного оборудования (вследствие более низких температур горения суспензий по сравнению с углем продлевается срок безаварийной эксплуатации).



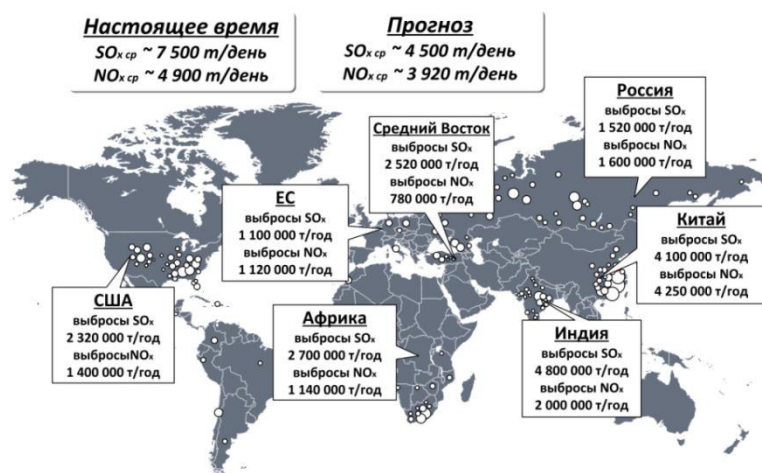


Рис.12. Объемы выбросов  $SO_x$  и  $NO_x$  по всему миру (с учетом прогнозируемого снижения за счет применения КЖТ вместо угля и мазута на ТЭС)

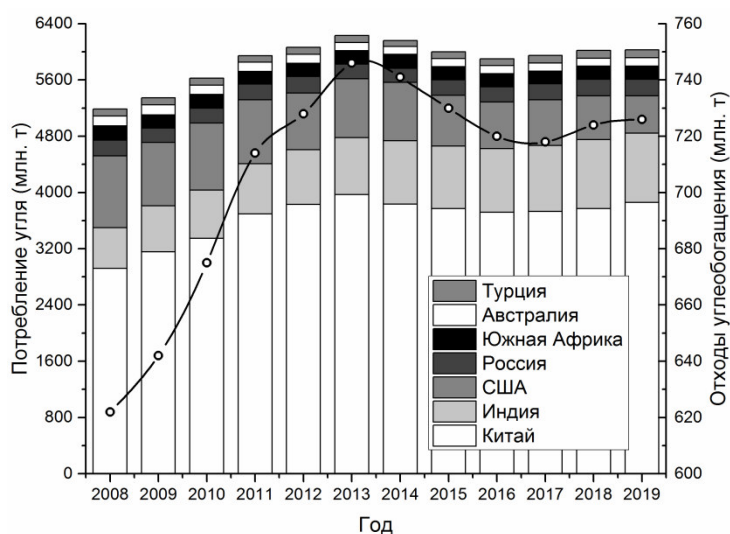


Рис.13. Тенденции роста потребления угля и отходов углеобогащения в 2008–2019 годах

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

Следует отметить, что добыча 1 тыс. тонн угля приводит к возникновению более 100 м<sup>3</sup> отходов углеобогащения. При этом темпы формирования влажных отходов переработки угля намного превышают

объемы их использования. Для складирования подобных отходов отводятся значительные территории. По всему миру насчитывается около сотен га земель. Накопленные и накапливаемые отходы углеобогащения оказывают масштабное и длительное по времени негативное воздействие на окружающую природную среду и население.

## Основные результаты и выводы

1. Разработан подход к проведению комплексного технико-экономического обоснования 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  $\gamma_i$  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.

### Основные публикации по теме диссертации

1. **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.
2. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / М.А. Dmitrienko (Kurgankina), G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Journal of Hazardous Materials**. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.
3. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste / М.А. Dmitrienko (Kurgankina), P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2017. – V. 598. – P. 21–27.
4. **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 / М.А. Dmitrienko (Kurgankina), P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2018. – V. 613–614. – P. 1117–1129.
5. **Dmitrienko (Kurgankina) M.A.** Experimental evaluation of main emissions during coal processing waste combustion / М.А. Dmitrienko (Kurgankina), J.C. Legros, P.A. Strizhak // **Environmental Pollution**. – 2018. – V. 233. – P. 299–305.
6. **Kurgankina M.A.** Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives / М.А. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Journal of Cleaner Production**. – 2018. – V. 177. – P. 284–301.
7. **Kurgankina M.A.** Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / М.А. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Science of the Total Environment**. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.
8. **Kurgankina M.A.** Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals / М.А. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Applied Thermal Engineering**. – 2019. – V. 147. – P. 998–1008.
9. **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.
10. **Kurgankina M. A.** Ecological assessment of industrial waste as a high-potential component of slurry fuels / М.А. Kurgankina (Dmitrienko), G. S. Nyashina, P. A. Strizhak // **Waste and Biomass Valorization**. – 2021. – V. 12, №3. – P. 1659–1676.

