

Няшина Галина Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ
ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НА
ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ СЖИГАНИИ
СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ ИЗ ОТХОДОВ
УГЛЕБОГАЩЕНИЯ И БИОМАССЫ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Любов Виктор Константинович, доктор технических наук, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (г. Архангельск), институт энергетики и транспорта, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск)

Защита состоится «17» октября 2018 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 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: <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>

Автореферат разослан «27» августа 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Матвеев Александр
Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Многие экономические, социальные, межэтнические, геополитические и экологические кризисы в последние два десятилетия происходят по причине разных точек зрения на проблемы распределения и использования энергоресурсов планеты. На протяжении начала XXI века сформировалось устойчивое мнение о том, что энергоресурсы управляют миром. На первый план выходят три основных проблемы. *Во-первых*, традиционные ресурсы энергетики – нефть и газ достаточно интенсивно истощаются. *Во-вторых*, в последние годы особенно нестабильны цены на эти два энергоресурса. Затянувшиеся экономические и геополитические кризисы становятся чрезвычайно ущербными для многих регионов и государств. *В-третьих*, значительны экологические проблемы (например, вследствие антропогенных выбросов оксидов серы и азота, парниковых эффектов) при использовании энергоресурсов даже самого высокого качества.

За последние 50 лет темпы мирового роста населения увеличились почти в два раза. Как следствие, существенно возросло потребление энергии за счет развития новых технологий, которые, несмотря на получаемую пользу и выгоду, основаны на довольно небезопасной и ограниченной энергетической структуре, полученной из ископаемого топлива (угля, нефти и природного газа). Рост потребления электроэнергии в мире обеспечивается в основном за счет увеличения спроса в развивающихся экономиках (рис. 1). Потребление угля в Китае, Индии, Южной Корее и других наиболее интенсивно развивающихся странах (табл. 1) растет высокими темпами, а в развитых государствах сохраняются значительные объемы.



Рис.1. Мировое потребление электроэнергии и прирост населения (на основе статистических данных BP Statistical Review of World Energy, 2017)

Табл. 1. Потребление угля в мире для производства энергии на ТЭС, млн. тонн (BP Statistical Review of World Energy, 2017)

Страна	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2020
Китай	1455	1584	1609	1686	1749	1904	1928	1969	1954	1913	1888	1880
США	565	573	564	496	525	495	437	454	453	396	358	325
Россия	97	93.9	100	92.2	90.5	94.0	98.4	90.5	87.6	92.2	87.3	86

Индия	219	240	259	283	290	304	330	353	388	397	412	540
Южная Корея	54.8	59.7	66.1	68.6	75.9	83.6	81	81.9	84.6	84.5	81.6	105
Малайзия	7.3	8.8	9.8	10.6	14.8	14.8	15.9	15.1	15.4	16.9	19.9	29
Индонезия	28.9	36.2	31.5	33.2	39.5	46.9	53.0	57.0	45.1	51.2	62.7	80
Тайвань	37	38.8	37.0	35.2	37.6	38.9	38	38.6	39	37.8	38.6	40

В настоящее время в структуре глобального энергопотребления посредством сжигания угля на ТЭС производится более 39 % объема мировой электрической энергии. По прогнозам экспертов к 2035 году этот показатель может снизиться до 33 %. Однако с учетом того, что потребление электроэнергии должно возрасти на 43 % за тот же период, представленное значение отражает, по крайней мере, устойчивые позиции угольной теплоэнергетики и большие перспективы ее развития. Эти прогнозы укрепляются при учете современных тенденций существенного снижения доли энергии, вырабатываемой АЭС, а также слишком малыми объемами энергии (не более 15–20% от требуемой), получаемыми от альтернативных источников.

Указом Президента РФ (№ 7 от 5 января 2016 г.) 2017 год в России объявлен годом экологии. Во многих государствах Европы, Азии, Северной Америки экологическим аспектам и глобальному потеплению уделяется первостепенное внимание. Большая часть выбросов приходится на энергетический сектор (в первую очередь, ТЭС и крупные котельные) с традиционными топливами. Существенное негативное воздействие основного твердого топлива – угля на окружающую среду проявляется на всех стадиях производства энергии. Извлечение угля связано с изменением ландшафта, образованием шахт, карьеров; транспорт угля – с потерями, рассеиванием твердых частиц в почву и в атмосферу. При сжигании твердого углеродного топлива на ТЭС в атмосферу поступают: летучая зола, частицы несгоревшего топлива, сернистый и серный ангидриды, окислы азота, серы, углерода, фтористые соединения. Более 50 % мировых выбросов SO₂, образующихся в энергетическом секторе, приходится на долю угля. Вклад по NO_x от сжигания угля составляет 20 % (табл. 2).

Табл. 2. Выбросы SO₂ и NO_x в зависимости от вида топлива (International Energy Agency. Energy and Air Pollution, 2016)

Топливо	2005	2010	2015	2020	2030	2005	2010	2015	2020	2030
	SO ₂ , млн.тонн/год					NO _x , млн.тонн/год				
Уголь	56.2	52.1	51.5	50.5	48.8	18.2	19.3	20.3	21.2	23.9
Нефть	19.7	17.1	16.0	15.4	14.8	45.0	39.8	34.7	30.9	31.6
Газ	2.1	2.2	3.3	4.0	5.3	9.5	9.5	9.2	9.2	10.1
Биомасса	2.1	2.1	2.3	2.4	2.9	3.1	3.3	3.6	3.8	4.2
Всего	80.1	73.5	73.1	72.3	71.8	75.8	71.9	67.8	65.1	69.8

Страны с развитой угольной теплоэнергетикой оказывают определяющее влияние на проблемы глобального потепления планеты. Хорошо известны вытекающие в связи с негативным воздействием угольных теплоэнергетических предприятий на человечество и окружающую природу последствия, такие как ухудшение здоровья, повышение смертности населения, вымирание и миграция животных, уменьшение площадей экологически чистых лесных массивов.

В процессе обогащения угля образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеков и шламов), масса которых на сегодняшний день оценивается сотнями миллионов тонн. Ежегодный прирост таких отходов прямо пропорционален росту добычи угля (10–12 % от объема угля). Становится актуальной масштабная утилизация шламов и кеков путем их сжигания в составе топливных суспензий. Кроме того, добываются большие объемы низкосортных углей, которые также целесообразно эффективно использовать. Горючие отходы обогащения угля являются перспективными компонентами для приготовления водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив. Применение суспензионных топлив позволяет повысить эффективность сжигания угля, утилизировать угольные шламы, а также снизить концентрации выбросов в атмосферу (в первую очередь, SO_x и NO_x).

Использование отходов переработки угля для получения ВУТ и ОВУТ позволяет существенно упростить технологические схемы приготовления топлива (отсутствуют затраты на первичную подготовку топлива, связанную с помолом, сушкой, смешением и др.), а также снизить штрафы производств за загрязнение окружающей среды отходами углеобогащения. Но фильтр-кеки по сравнению с углями имеют малое содержание углерода и летучих, высокую зольность. Эти характеристики у кеков близки низкосортным углям. Как следствие, фильтр-кеки выступают в роли низкореакционных топливных компонентов (времена задержки зажигания таких топлив довольно большие). Одним из направлений интенсификации процессов зажигания суспензий ВУТ и ОВУТ является добавление горючих жидкостей (отработанных турбинных, трансформаторных, автомобильных и других масел; нефтяных шламов). Так как для повышения теплоты сгорания и увеличения срока хранения, а также оптимизации затрат на транспортировку в ВУТ добавляются горючие вещества, то можно ожидать рост концентрации антропогенных выбросов. Данную проблему можно решить за счет введения в суспензии ВУТ и ОВУТ твердых или жидких добавок из числа биомассы, бытовых и промышленных отходов. В настоящее время одной из современных технологий, направленной на минимизацию негативного влияния объектов теплоэнергетики на окружающую среду, является совместное сжигание угольных топлив и биомассы (древесина, отходы агропромышленного комплекса, например, солома, лузга подсолнечника и др.). В странах Европы (Финляндия, Германия, Дания) и Северной Америке на ТЭС, где основным видом топлива является уголь, в последние годы все чаще используют для совместного сжигания биомассу (табл. 3).

Табл. 3. Совместное сжигание биомассы с углем на ТЭС (на основе отчетных данных 2014 г.)

Количество станций	Страны									
	США	Финляндия	Германия	Дания	Великобритания	Швеция	Италия	Австралия	Канада	Остальные страны
Количество станций	40	78	27	9	18	15	7	8	7	19
Всего	228									

Целесообразным представляется проведение анализа не только энергетических или технико-экономических показателей замены угля на суспензии ВУТ и ОВУТ, но

и, главным образом, основных антропогенных выбросов для суспензий с существенно отличающимся компонентным составом, теплотворной характеристикой и стоимостью. Помимо заметы традиционного угольного топлива на суспензии ОБУТ к исследуемым в настоящей работе способам снижения влияния ТЭС на окружающую среду относятся выбор компонентного состава и массовых концентраций компонентов в нем, определение температурного диапазона, для которого выявлен максимально положительный экологический эффект от применения водосодержащих угольных топлив, экологическая утилизация зольного остатка в строительной промышленности, анализ технологий сжигания и их влияние на антропогенные выбросы при применении разных методик, а также рассмотрение процесса образования золы на стенках трубок пароперегревателей и экономайзеров и ее влияние на тепловой поток. В этом случае исследование всех перечисленных способов дает возможность выполнить объективные оценки и развивать современные представления о позитивном экологическом будущем угольной теплоэнергетики при использовании суспензионных топлив.

Целью работы является исследование способов снижения концентраций основных газовых антропогенных выбросов (оксидов серы и азота) ТЭС при замене традиционных угольных топлив на суспензионные, приготовленные из отходов углеобогащения и нефтепереработки с добавками биомассы из числа отходов лесопиления и деревообработки, маслосодержащих отходов переработки растительного сырья, а также коммунальных и бытовых отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Сравнительный анализ диапазонов изменения концентраций основных газовых антропогенных выбросов ТЭС, работающих на угле, мазуте, газе, а также группы суспензионных топлив (водоугольных и органоводоугольных).
2. Определение номенклатуры и оптимальных (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) концентраций перспективных компонентов суспензионных топлив, обеспечивающих существенное снижение влияния ТЭС на окружающую среду.
3. Разработка экспериментальной методики, создание стенда и проведение экспериментальных исследований по оценке концентраций основных газовых антропогенных выбросов (оксидов серы и азота), образующихся при сжигании перспективных суспензионных топлив.
4. Экспериментальное определение зависимостей экологических характеристик сжигания перспективных топливных суспензий от температуры в камере сгорания, концентрации и свойств горючих компонентов, концентрации и свойств добавок, способа приготовления, тонины помола и других основных параметров и факторов.
5. Формулирование обобщающих критериальных выражений, учитывающих экологические, энергетические и технико-экономические характеристики сжигания перспективных суспензионных топлив.
6. Сравнительный анализ относительных показателей (часто используют термины «относительные характеристики» или «характеристические индикаторы и

параметры») эффективности использования традиционных и перспективных суспензионных топлив на ТЭС.

7. Разработка рекомендаций по использованию результатов диссертационных исследований для снижения негативного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду.

Научная новизна работы. Разработана экспериментальная методика для проведения исследований по определению компонентного состава газовых антропогенных выбросов и их концентраций, формирующихся при сжигании суспензионных топлив, приготовленных на основе промышленных отходов (углеобогащения и нефтепереработки) с перспективными специализированными добавками (биомассы из числа отходов лесопиления и деревообработки, маслосодержащих отходов переработки растительного сырья, а также коммунальных и бытовых отходов). Определены оптимальные (с точки зрения наиболее важных для ТЭС основных экологических, энергетических и технико-экономических характеристик) соотношения компонентов суспензий ВУТ и ОВУТ (с учетом добавок). Установлены диапазоны температур сжигания, обеспечивающих получение максимальной экологической эффективности суспензионных топлив по сравнению с углем. Сформирована не имеющая аналогов информационная база данных с относительными (в сравнении с углем) показателями эффективности суспензионных топлив, учитывающих экологические, энергетические и технико-экономические характеристики.

Практическая значимость работы. Для большой группы составов суспензионных топлив, компонентами которых являются типичные отходы углеобогащения, низкосортные угли разных марок, промышленные отходы, отработанные горючие жидкости нефтяного происхождения, а также растительные добавки определены диапазоны концентраций основных газовых антропогенных выбросов: оксидов серы и азота. Обоснованы экологические, экономические, энергетические и социальные эффекты от сжигания в котлах ТЭС перспективных композиционных топлив на основе промышленных отходов и растительных добавок. Экологический эффект определяется снижением концентраций основных антропогенных выбросов угольных ТЭС и освобождением территорий отвалов от промышленных отходов за счет задействования последних в составе перспективных топлив. Экономический эффект состоит в сжигании в топках котлов ТЭС вместо основных видов топлив (угля, мазута, газа) перспективных суспензий, стоимость которых низка и в основном зависит от расходов на транспортировку их компонентов. Энергетический эффект определяется обеспечением возможности получения довольно высокой (по сравнению с ВУТ и низкосортными углями) теплоты сгорания топливных композиций при рациональном смешивании твердых и жидких горючих компонентов из числа отходов. Социальный эффект заключается в том, что станет возможным снизить влияние угольных ТЭС на здоровье и смертность населения, а также состояние окружающей среды в целом.

Результаты диссертационных исследований используются при выполнении инвестиционного проекта, направленного на создание первого в России опытно-

промышленного участка подготовки и сжигания органоводоугольного топлива с применением промышленных и бытовых отходов. Плановые сроки реализации проекта: 2018–2021 гг. Объект – группа угольных котельных в г. Томск.

Достоверность полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях параметров, использованием современных газоаналитических систем и программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования по оценке экологического воздействия угольных ТЭС на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив на основе индустриальных отходов и специализированных добавок выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15–19–10003) и проекта ВИУ-ИШФВП-184/2018 в рамках программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета. Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий Российской Федерации «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» и «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии». Диссертация соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642), так как направлена на разработку научных основ экологически чистых технологий в угольной теплоэнергетике, основанных на использовании вместо угля суспензионных водосодержащих топлив, приготовленных из отходов угле- и нефтепереработки, растительных и прочих компонентов. Использование таких топливных композиций способствует эффективной утилизации многочисленных индустриальных отходов, снижению антропогенной нагрузки угольных ТЭС, а также снижению затрат на приобретение сырья, его переработку, подготовку топлива и др.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Концентрации основных газовых антропогенных выбросов (NO_x и SO_x) при сжигании суспензионных водосодержащих топлив (ВУТ и ОВУТ) из отходов углеобогащения ниже на 20–75 % по сравнению со сжиганием угля.
2. Концентрации SO_x и NO_x уменьшаются в 2.5–10 раз при снижении температуры в камере сгорания с 1000 до 700 °С. При варьировании содержания основных компонентов суспензионных топлив выбросы SO_x и NO_x изменяются в диапазоне от 20 до 60 %. Варьирование размеров угольных частиц и способа приготовления суспензий позволяет изменять концентрации SO_x и NO_x в диапазоне от 2.5 до 15 %.
3. Введение в состав ОВУТ даже 7–15 % (отн. масс.) добавок растительного происхождения приводит к снижению концентраций оксидов азота на 5–60 %, а концентрации оксидов серы – на 10–85 %. Наиболее перспективными с точки

зрения минимальной трудоемкости приготовления, а также относительных экологических и энергетических характеристик являются добавки опилок, лесных горючих материалов и сельскохозяйственных отходов.

4. Обоснована целесообразность использования отходов большой группы отраслей промышленности и народного хозяйства, таких как мел (яичная скорлупа), иловые отложения, грунт, загрязненный нефтешламами, пищевые отходы и др., в качестве компонентов топливных суспензий. Наибольшее позитивное влияние на экологические характеристики сжигания суспензионных топлив оказала добавка иловых отложений в количестве 10 %: концентрации NO_x и SO_x уменьшились на 5–42 % относительно фильтр-кеков и угольных шламов.
5. Числовые значения относительных показателей эффективности сжигания суспензионных топлив с добавками соломы, отходов подсолнечника, лесных горючих материалов, отходов лесопиления, деревообработки и отходами других отраслей промышленности могут достигать 165.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментов, выборе методов, алгоритмов и средств регистрации, проведении серий опытов, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, расчете относительных показателей эффективности суспензионных топлив в сравнении с углем, установлении рациональных температурных режимов сжигания топлив, разработке рекомендаций использования полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на II Международной конференции «Рациональное природопользование: традиции и инновации» (Москва, 2017), XXI Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр (Томск, 2017), Международной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования (Томск, 2017), V Международном молодёжном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017), Международной научной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017), MCS-10: Tenth Mediterranean Combustion Symposium (Неаполь, 2017), XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017), XXII Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр (Томск, 2018), International Conference on Combustion Physics and Chemistry (Сапара, 2018), 5th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow (HTFF'18) (Мадрид, 2018), XXXIV Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2018).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 4 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Химия твердого топлива», «Кокс и химия», «Известия высших учебных заведений.

Проблемы энергетики», «Химическое и нефтегазовое машиностроение». Опубликовано 7 работ в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Journal of Cleaner Production» (ИФ=5.7), «Journal of Hazardous Materials» (ИФ=6.4), «Environmental Pollution» (ИФ=4.4), «Energies» (ИФ=2.7), «JP Journal of Heat and Mass Transfer».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 201 странице машинописного текста, содержит 41 рисунок и 23 таблицы. Библиография включает 252 наименования.

Краткое содержание работы

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

В первой главе проанализировано современное состояние исследований антропогенного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду. Выполнен анализ: современных способов и технологий очистки дымовых газов; основных достоинств и недостатков каждой из технологий; современного состояния теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания и горения водоугольных и органомоугольных суспензий; перспективных добавок к суспензионным топливам; нерешенных задач, а также проблем, сдерживающих развитие топливных технологий с добавками биомассы из числа отходов лесопиления и деревообработки, маслосодержащих отходов переработки растительного сырья. За последние 25–30 лет разработаны научные основы сжигания ВУТ и ОВУТ в модельных камерах и топках энергетических котлоагрегатов. Наибольший вклад внесли известные специалисты: Алексеенко С.В., Баранова М.П., Богомолов А.Р., Бурдуков А.П., Валиуллин Т.Р., Ведрученко В.Р., Вершинина К.Ю., Горлов Е.Г., Делягин Г.Н., Дектерев А.А., Дзюба Д.А., Заостровский А.Н., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Кузнецов Г.В., Мальцев Л.И., Мурко В.И., Овчинников Ю.В., Осинцев В.В., Патраков Ю.Ф., Попов В.И., Пузырев Е.М., Саломатов В.В., Стрижак П.А., Сыродой С.В., Шевырев С.А., Цепенюк А.И., Федорова Н.И., Федяев В.И., Ходаков Г.С., Чернецкий М.Ю., Gajewski W., Hu B., Kefa C., Kijo-Kleczkowska A., Kim S.H., Lee C.H., Liu J., Liu H., Manwani P., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Svoboda K., Sakai T., Wang H., Zhu M. и др. Разработаны уникальные экспериментальные методики, стенды, испытательные комплексы, перспективные физические и математические модели. Получены зависимости интегральных характеристик зажигания и горения ВУТ и ОВУТ от основных параметров процесса. В большинстве публикаций по тематике ВУТ и ОВУТ горючей основой для суспензий являются энергетические угли в измельченном состоянии. Немногочисленные результаты исследований процессов зажигания и горения ВУТ и ОВУТ получены для отходов углеобогащения. Исследования экологических характеристик сжигания водоугольных топлив также освещены не в полной мере. Пока мало обоснованных экспериментальных данных о концентрациях антропогенных выбросов оксидов серы и азота. Не сформирована база экологических характеристик сжигания суспензионных топлив с добавками биомассы. Не установлен

вклад компонентов и добавок в суспензионных топливах. Это сдерживает обоснование выбора перспективных добавок к ВУТ и ОВУТ для минимизации негативного влияния ТЭС на окружающую среду.

Во второй главе приведено описание методик определения характеристик процессов сжигания топлив и выбора наиболее целесообразной для измерения концентраций антропогенных выбросов, образующихся при сжигании ВУТ и ОВУТ. Представлена схема созданного экспериментального стенда и разработанная автором методика измерения концентраций продуктов сгорания, образующихся при горении ВУТ и ОВУТ, а также рассмотрены использованные методы приготовления суспензий и оценки стабильности (соответственно, расслаиваемости) последних.

Компонентная база для приготовления суспензий ОВУТ включала каменные угли марок «К», «Д», «Т», «СС», «Г», отходы обогащения (фильтр-кеки) тех же марок, бурый уголь марки «2Б», антрацит, углеродный остаток пиролиза автомобильных шин. В качестве жидкого горючего компонента использовались отработанное турбинное масло и мазут. В перечень растительных добавок входили солома, опилки, водоросли, древесный уголь, лиственный и хвойный опад, древесная кора, маслосодержащие отходы растительных масел и масла, глицерин, скипидар, биоэтанол и др.

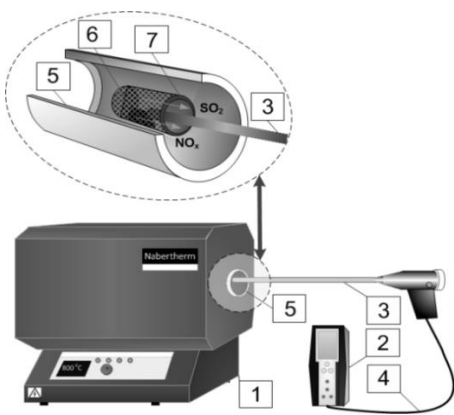


Рис. 2. Схема стенда: 1 – муфельная печь; 2 – газоанализатор; 3 – модульный зонд; 4 – газоотборный шланг; 5 – керамическая труба нагрева; 6 – навеска топлива; 7 – металлическая сетка.

Для определения концентраций основных газовых компонентов продуктов сгорания, образующихся при горении ВУТ и ОВУТ, использовался экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 2. Можно выделить несколько блоков и узлов стенда: камера сгорания (на основе трубчатой муфельной печи), газоанализирующее и регистрирующее оборудование.

Методика, позволяющая определить компонентный состав образующихся выбросов при сжигании топлив, включала следующие процессы: подготовка топливного образца, помещение его в камеру сгорания, забор и регистрация образующихся газов. В керамической трубке 5 (внутренний диаметр 0.05 м, длина 0.55 м) муфельной печи 1 температура воздуха изменялась в диапазоне 700–1000 °С.

Повышение температуры в камере сгорания выполнялось с помощью интегрированных регулятора и термопары (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1400 °С, предел допускаемых отклонений ± 1 °С). Образец топлива 6 (масса 1 г) помещался на подложку, выполненную из нержавеющей стальной сетки 7, которая с помощью крепежных элементов фиксировалась на конце модульного зонда 3 газоанализатора 2. Измерительные каналы: NO_x (диапазон 0–4000 ппм, доп. погрешность ± 5 % от изм. знач.), SO_x (диапазон 0–5000 ппм, ± 10 % от изм. знач.). Смонтированная конструкция крепилась на координатный механизм, который в автоматическом режиме обеспечивал ее перемещение (со скоростью 0.5 м/с) в сквозную керамическую трубу

нагрева 5 муфельной печи 1. Во время проведения эксперимента отверстие, через которое топливо помещалось в печь, герметично закрывалось минеральным теплоизоляционным материалом для устранения неконтролируемого притока воздуха (коэффициент избытка воздуха во всех опытах составлял 1.05). Регистрация концентраций газовых выбросов проводилась в течение 5 мин. Образующиеся при горении топлива дымовые газы поступали к чувствительному элементу зонда 3. По газоотборному шлангу 4 проба достигала измерительных сенсоров газоанализатора 2. Встроенный мембранный насос автоматически поддерживал постоянство потока дымовых газов к сенсорам, для защиты которых от высоких концентраций выбросов предусмотрена функция автоматической продувки сенсоров воздухом. Газоанализатор 2 подключался к компьютеру, на котором устанавливалось программное обеспечение EasyEmission, позволяющее осуществлять непрерывный мониторинг образующихся при горении дымовых газов (рис. 3).

При идентичных начальных условиях проводились от 6 до 10 экспериментов в рамках одной серии измерений. Затем выполнялось усреднение результатов экспериментов, определение доверительных интервалов и соответствующих случайных погрешностей. При усреднении учитывались результаты опытов, отличающиеся от средних не более чем на 2.5%. Этот диапазон был выбран с учетом погрешностей и функциональных возможностей газоаналитического оборудования.

Для оценки преимуществ и недостатков технологий сжигания суспензий ВУТ и ОВУТ разработан мультипликативный критерий. Входящие в него относительные характеристики позволяют проводить совместную оценку экологических, энергетических и технико-экономических индикаторов использования суспензионных топлив в теплоэнергетике. Рассмотрены несколько определяющих параметров, которые можно считать индикаторами приоритетности применения топлив. В частности, к таким параметрам относятся: концентрации газовых основных выбросов (оксидов серы и азота), теплотворная способность и стоимость топлива. Стоимость и теплота сгорания ОВУТ определяются исходя из данных о стоимости и теплоте сгорания каждого отдельного компонента смеси с учетом их массовых концентраций. Условную среднюю стоимость топливных суспензий можно рассчитать на примере соответствующих цен в России (значения в целом сопоставимы для Китая, Индии и группы других государств). Разработанный подход оценки целесообразности применения суспензионных топлив подразумевает расчет обобщенного интегрального показателя, который характеризует выработку энергии с учетом стоимости топлива и концентрации основных выбросов:

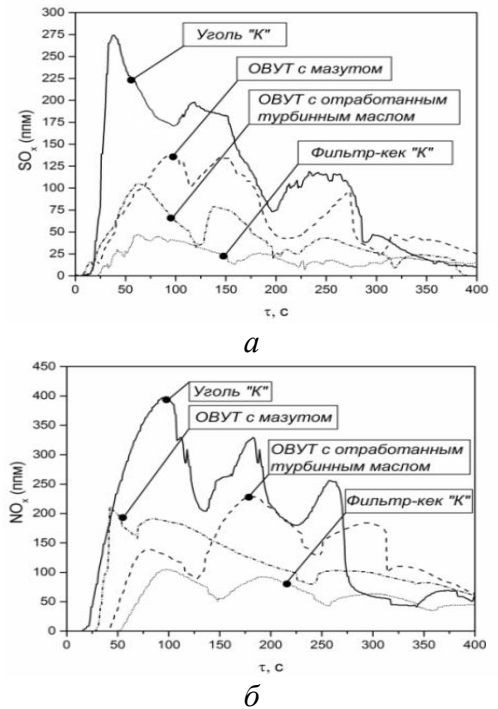


Рис. 3. Тренды SO_x (а) и NO_x (б) при сжигании угольной пыли, ВУТ и ОВУТ с мазутом или турбинным маслом при температуре в камере сгорания $800^\circ C$

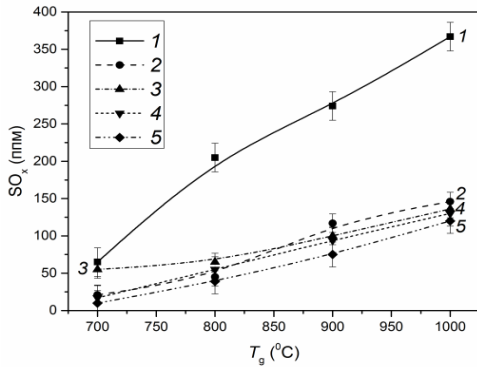
$$D^{SO_x} = Q_{s_OBYT}^a / (C_{OBYT} \cdot SO_{x_OBYT}); D^{NO_x} = Q_{s_OBYT}^a / (C_{OBYT} \cdot NO_{x_OBYT});$$

$$D^{NO_x \& SO_x} = D^{SO_x} \cdot D^{NO_x}.$$

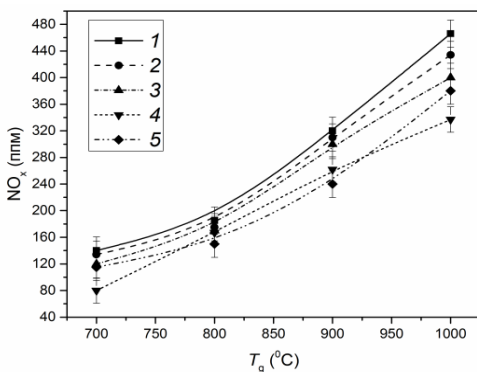
где $Q_{s,V}^a$ – теплота сгорания топлива, МДж/кг; C – стоимость, \$/кг; NO_x , SO_x – концентрации антропогенных выбросов, ппм.

Для иллюстрации преимуществ применения суспензий ОВУТ вычислены отношения показателей $D_{OBYT}^{NO_x \& SO_x}$ для ОВУТ и угля:

$$D_{relative} = D_{OBYT}^{NO_x \& SO_x} / D_{уголь}^{NO_x \& SO_x}.$$



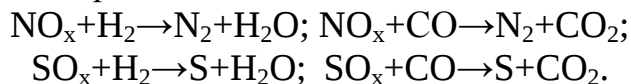
а



б

Рис. 4. Концентрации антропогенных выбросов (а – SO_x , б – NO_x) при сжигании топлив в условиях разных температур сжигания: 1 – каменный уголь «К» (пыль) 100 %; 2 – кек «К» 90 %, мазут 10 %; 3 – кек «К» 90 %, отработанное турбинное масло 10 %; 4 – кек «К» 100%; 5 – каменный уголь «К» (пыль) 50 %, вода 50 %

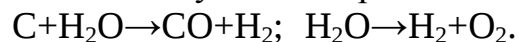
способствует процессу горения, а водород в качестве восстановителя способствует снижению оксидов азота и серы в дымовых газах:



Снижение выбросов NO_x и SO_x в случае сжигания водоугольных и органомоугольных топлив обусловлено соответствующими химическими реакциями, в которых участвует вода (несущая среда суспензий).

При взаимодействии перегретого пара с топливным углеродом образуется монооксид углерода и свободный водород. Присутствие водной фазы в составе

В третьей главе приведены основные результаты выполненных экспериментальных исследований. Установлено, что концентрации NO_x и SO_x при сжигании суспензионных водосодержащих топлив (ВУТ и ОВУТ) из отходов углеобогащения ниже на 20–75 % по сравнению со сжиганием угля. На рис. 4 приведены значения концентраций NO_x и SO_x , установленные при варьировании температуры в камере сгорания в широком диапазоне. Интенсивное образование оксидов азота и серы начинается при температурах сжигания выше 600 °C. При анализе процесса горения суспензий ВУТ и ОВУТ отмечено несколько эффектов, существенно влияющих на образование оксидов серы и азота. Во-первых, благодаря присутствию в композиционном топливе воды температура и скорость сгорания снижаются, что приводит к уменьшению образования антропогенных выбросов NO_x и SO_x . Во-вторых, взаимодействие суспензий с разогретым воздухом сопровождается процессом испарения воды и жидкого горючего компонента (в случае ОВУТ). Образующиеся пары в ходе термического разложения под действием высоких температур высвобождают молекулы кислорода и водорода:



Кислород, образовавшийся в ходе реакции,

суспензии является главной причиной снижения недожога. Наличие перегретого пара в зоне горения способствуют более тонкому распылению углеродной основы за счет микровзрывов суспензионных капель.

Температурный режим сжигания имеет определяющее влияние на состав выбросов, образующихся при сжигании суспензионных топлив – концентрации SO_x и NO_x уменьшаются в 2.5–10 раз при снижении температуры в камере сгорания с 1000 до 700 °С. При высоких температурах сжигания реакционная способность топлив повышается, происходит более активное окисление элементов топлива, в частности серы и азота. Также установлено, что при варьировании содержания основных компонентов суспензионных топлив выбросы SO_x и NO_x изменяются в диапазоне от 20 до 60 % (рис. 5, 6). Сравнительный анализ полученных результатов показал, что концентрации выбросов от сжигания ОБУТ на основе каменного угля намного ниже (в среднем SO_x на 50 %, NO_x на 35 %), чем от ОБУТ на основе бурого угля. Значения максимальных концентраций выбросов при сжигании ОБУТ с содержанием угля 60 % близки (отличия менее 20 %) к соответствующим значениям выбросов загрязняющих веществ при сжигании угля. Этот результат, а также известные ограничения по реологическим характеристикам позволяют сделать вывод о нецелесообразности повышения концентрации угля в составе ВУТ и ОБУТ более 50–60 %. Следует отметить, что варьирование концентрации угля и воды в составе топливных композиций главным образом влияет на теплоту сгорания последних. Поэтому пороговые (минимальные) значения концентраций угля в составе суспензий ВУТ или ОБУТ зависят от требуемой теплоты сгорания топлива. Традиционно считается, что вклад всех компонентов ВУТ и ОБУТ в суммарную теплоту сгорания является аддитивным. Как следствие, теплота сгорания может меняться от минимальных значений (6–8 МДж/кг) до максимальных (14–20 МДж/кг). Также концентрация угля в ВУТ и ОБУТ существенно влияет на стоимость топливных суспензий. Последняя может возрасти в несколько раз при повышении концентрации угля от 30 % до 60 %.

С увеличением доли жидкой горючей составляющей (отработанного турбинного масла) в суспензии возрастают концентрации SO_x и NO_x (рис. 6) в продуктах сгорания. Увеличение SO_x обусловлено увеличением общего серосодержания всей смеси за счет роста доли горючей жидкости. Зарегистрирован рост концентраций оксидов серы в пределах 25–55 %. Присутствие жидкой горючей составляющей способствует

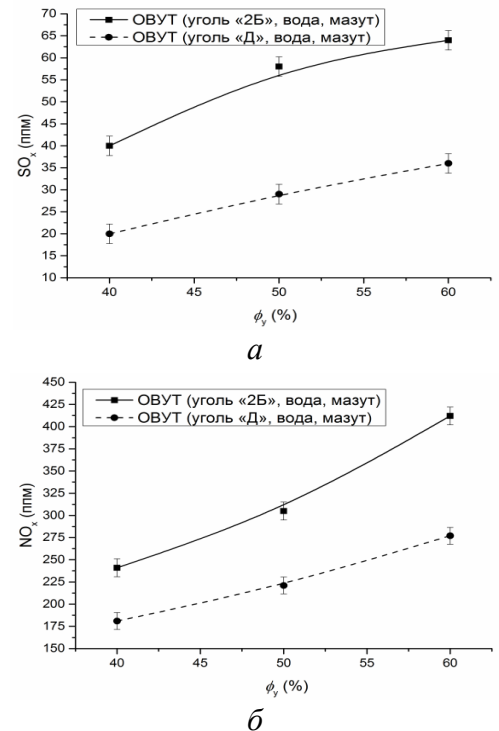


Рис. 5. Зависимости концентраций SO_x (а), NO_x (б) от содержания угля (ϕ_y) в суспензиях ОБУТ на основе мазута (10 %) при температуре в камере сгорания 800 °С

увеличению летучих компонентов в процессе горения, что приводит к повышению температуры горения. Происходит более полное выгорание твердой основы топлива.

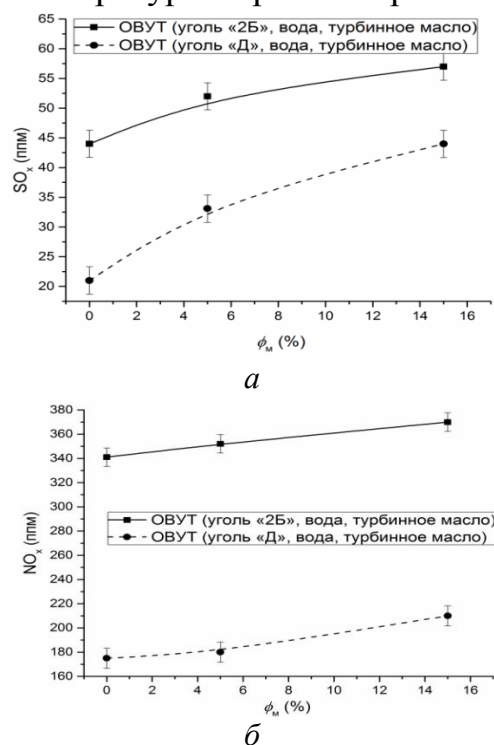


Рис. 6. Зависимости концентраций SO_x (а), NO_x (б) от содержания отработанного турбинного масла (ϕ_m) в ОВУТ при температуре в камере сгорания 800 °С

минимальной трудоемкости приготовления, а также относительных экологических и энергетических характеристик являются добавки опилок, лесных горючих материалов и сельскохозяйственных отходов.

В табл. 4 приведены значения концентрации антропогенных выбросов для группы ОВУТ с добавками растительного происхождения. В качестве основного компонента ОВУТ применялся фильтр-кек коксующегося каменного угля, (характеризуется средними экологическими характеристиками зажигания относительно газовых, длиннопламенных, тощих и слабоспекающихся углей), массовая концентрация которого варьировалась от 80 до 100 %.

Табл. 4. Концентрации антропогенных выбросов для ОВУТ с добавками биомассы

Температура в камере сгорания, °С	700		800		900		1000	
	SO_x	NO_x	SO_x	NO_x	SO_x	NO_x	SO_x	NO_x
1	17	80	55	167	94	262	130	337
2	55	110	65	170	100	300	136	400
3	30	158	40	164	89	209	116	231
4	36	86	44	160	65	240	108	300
5	10	31	17	104	70	166	98	190
6	17	102	28	147	64	168	96	226

7	12	158	25	164	94	193	132	213
8	21	168	34	211	68	280	105	330
9	20	140	47	160	88	180	110	200
10	19	86	20	100	41	130	73	150
11	15	90	57	180	107	266	146	337
12	18	135	70	220	105	308	140	450
13	160	260	183	280	200	300	220	330

1 – кек «К» 100 %; 2 – кек «К» 90 %, отработанное турбинное масло 10 %; 3 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, сосновые опилки 10 %; 4 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, кора дуба 10 %; 5 – кек «К» 80%, отработанное турбинное масло 10 %, древесный уголь 10 %; 6 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, лиственный и хвойный опад 10 %; 7 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, солома 10 %; 8 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, водоросли 10 %; 9 – кек «К» 80 %, отработанное турбинное масло 10 %, отходы подсолнечника 10 %; 10 – кек «К» 85 %, рапсовое масло 15 %; 11 – кек «К» 80 %, глицерин 20%; 12 – кек «К» 80 %, скипидар 20 %; 13 – кек «К» 80 %, биоэтанол 20 %.

Снижение концентраций оксидов серы для составов ОБУТ с твердыми растительными добавками объясняется тем, что в процессе термохимической конверсии (сжигания) высвобождаются соединения металлов, присутствующих в большом количестве в лесных, сельскохозяйственных и древесных компонентах. Данные соединения вступают в реакции с окислами серы (например, $2\text{CaO} + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CaSO}_4$) и образуются вещества, которые остаются в угольной золе и вносят вклад в реакции удержания серы за счет абсорбции серного газа. Конечными продуктами таких реакций могут являться KCl и K_2SO_4 , NaCl и Na_2SO_4 . Наиболее влияние на процессы снижения образования выбросов оксидов серы оказала добавка в виде 15 % смеси лесного горючего материала. Для рассматриваемого диапазона температур концентрации SO_x составили 17–96 ппм.

Снижение концентрации NO_x при применении ОБУТ вместо угля обусловлено несколькими причинами. *Во-первых*, за счет использования растительных добавок снижается доля угольного горючего компонента, который вносит основной вклад в формирование окислов азота. *Во-вторых*, за счет вовлечения низкореакционного компонента снижается температура газовой смеси, которая напрямую влияет на процессы образования NO_x . *В-третьих*, основное количество азота в рассматриваемых добавках выделяется во время сгорания летучих в виде восстановительных промежуточных продуктов или функциональных групп, немногие из которых могут быть превращены в NO_x . Из-за достаточно высокого количества летучих (более 50 %) в растительных компонентах, быстрого их выхода и последующего выгорания концентрация кислорода O_2 в камере сгорания снижается. Следовательно, в ходе реакций, в которых участвует топливный азот и кислород образуется меньшее количество NO_x .

В случае использования маслосодержащих отходов переработки растительного сырья или масел, в частности рапсового, в составах ОБУТ существенно повышаются экологические характеристики сжигания ввиду практически полного отсутствия в их составе серы и азота. Рапсовое масло более чем на 60 % состоит из ненасыщенных жирных кислот, средняя длина углеродной цепи приводит к более низкой температуре пламени (мононенасыщенные жирные кислоты менее стабильны и имеют меньшую теплотворную способность) и, следовательно, к снижению образования NO_x . При

проведении экспериментов установлено, что рассматриваемые твердые добавки могут существенно влиять на реологию топлива. Благодаря наличию достаточного количества капилляров и пор, обладающих большой суммарной поверхностью, они адсорбируют часть влаги топлива, тем самым препятствуя расслоению суспензии.

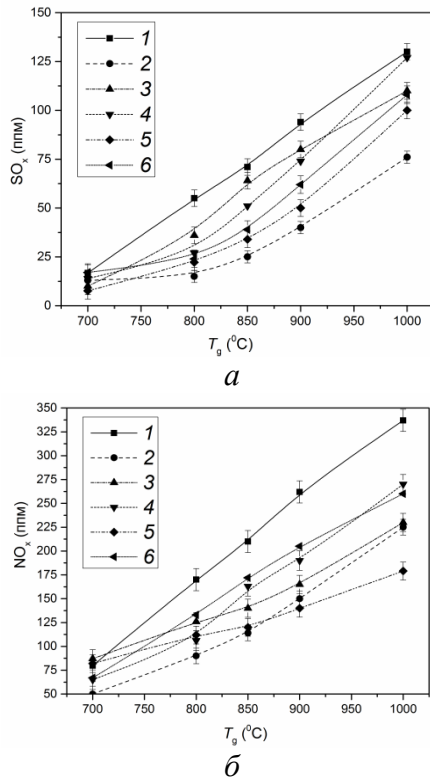


Рис. 7. Концентрации SO_x (a) и NO_x (б) в зависимости от температуры в камере сгорания: 1 – 100 % кек «К»; 2 – 90 % кек «К», 10 % иловые отложения; 3 – 95 % кек «К», 5 % песок; 4 – 90 % кек «К», 10 % смесь дробины солодовой и хлебной крошки; 5 – 90 % кек «К», 10 % скорлупа; 6 – 90 % кек «К», 10 % отходы картофеля

намного ниже, чем иловых отложений. Поэтому, исходя из имеющихся запасов, приоритет остается за добавкой иловых отложений.

На рис. 8 приведены наиболее демонстративные зависимости концентраций SO_x и NO_x при использовании ОБУТ с добавками в сравнении с известными данными других авторов (для иллюстрации экологических перспектив). Так же на рис. 8.в представлены значения концентраций SO_x и NO_x , образующиеся при сжигании разных масс топлива, которые необходимы для получения идентичной углю (в данном случае марки «К») тепловой энергии. Установлено, что кратное увеличение массы (более чем в 1.5 раза) не приводит к существенному росту выбросов оксиды серы и азота, вдобавок реализуется более масштабная утилизация отходов углеобогащения.

Обоснована целесообразность использования отходов большой группы отраслей промышленности и народного хозяйства, таких как мел (яичная скорлупа), иловые отложения, грунт, загрязненный нефтешламами, пищевые отходы и др., в качестве компонентов топливных суспензий. Наибольшее позитивное влияние на экологические характеристики сжигания суспензионных топлив оказала добавка иловых отложений в количестве 10 %: концентрации NO_x и SO_x уменьшились на 5–42 % относительно фильтр-кеков и угольных шламов.

Снижение (рис. 7) доли выбросов (от 5 до 42 %) обусловлено химическим составом вводимых в суспензии компонентов. Присутствующие в грунте и иловых отложениях металлы (Ca, Na, K) способны удерживать серу в золе, препятствуя образованию SO_x . Ионы металлов, такие как V, Ti, Cu, Fe и Mn оказывают каталитическое воздействие на NO_x с последующим образованием свободного азота N_2 . Низкие концентрации оксидов серы и азота во всем интервале температур сжигания (700–1000 °C) установлены для суспензии с добавкой 10 % яичной скорлупы. По своей природе скорлупа состоит на 90 % из карбоната кальция ($CaCO_3$) – соединения, использующегося в качестве сорбента и наиболее распространенного способа очистки дымовых газов на ТЭС от сернистого ангидрида. Однако необходимо помнить, что темпы формирования яичной скорлупы

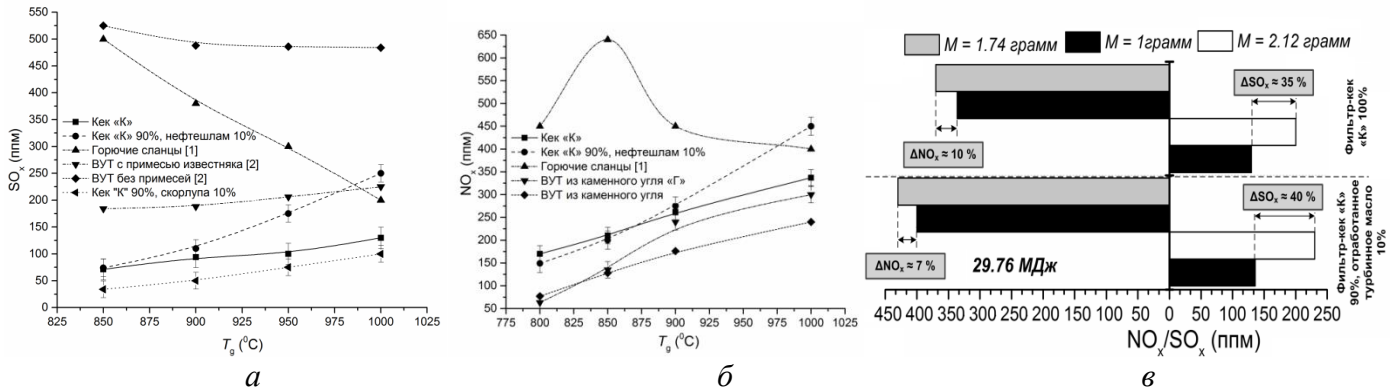


Рис. 8. Зависимости концентраций SO_x (а), NO_x (б) от температуры сжигания ОВУТ. Концентрации SO_x и NO_x (в), образующиеся при сжигании типичных масс топлива (ВУТ, ОВУТ) для получения идентичного угля количества тепловой энергии (29.76 МДж). Дополнительно приведены данные: [1] Liu, J. Co-firing of 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; [2] 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 et al. // MATEC Web Conferences. – 2016 – V. 72. – Article number 01074; [3] Мурко, В.И. Результаты исследования вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива / В.И. Мурко, В.И. Федяев, В.И. Карпенко, Д.А. Дзюба // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2012. – Т. 5. – С. 512–519.

В соответствии с методикой, представленной в главе 2, выполнены расчеты, позволяющие оценить энергетические, экологические и технико-экономические показатели сжигания рассматриваемых суспензий в сравнении с угольной пылью. Установлено, что числовые значения относительных показателей эффективности сжигания суспензионных топлив с добавками соломы, отходов подсолнечника, лесных горючих материалов, отходов лесопиления, деревообработки и отходами других отраслей промышленности могут достигать 165 (рис. 9, 10).

Можно сделать вывод о целесообразности использования широкой группы отходов (углеобогащения, нефтехимической и нефтедобывающей отраслей, деревообработки и сельского хозяйства и) для приготовления суспензионных топлив, не уступающих по экологическим, энергетическим и экономическим характеристикам традиционному углю.

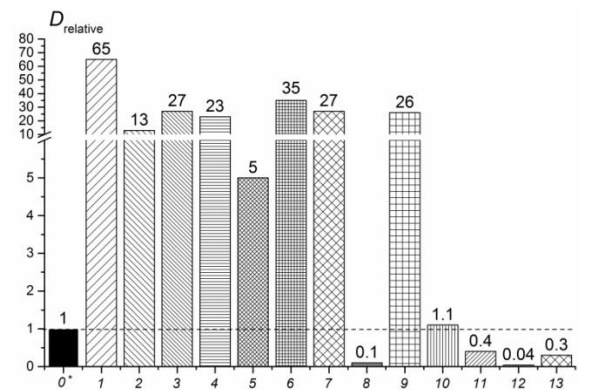


Рис. 9. Относительные показатели эффективности сжигания топлив разных компонентных составов (табл. 3) по сравнению с углем (состав 0*)

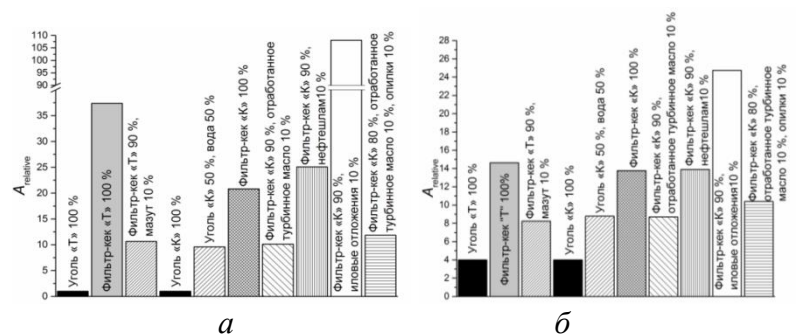


Рис. 10. Относительные показатели эффективности ОВУТ при перемножении (а) и суммировании (б) экологических, технико-экономических и энергетических сравниваемых параметров

Кроме снижения концентраций основных газовых антропогенных выбросов применение ОВУТ может позволить повысить энергетические характеристики работы котлов ТЭС. В частности, в диссертационной работе выполнены расчеты образования золы на стенках трубок пароперегревателей и экономайзеров. Показано, что выбросы летучей золы и окислов в несколько раз ниже, чем при сжигании углей. Летучая зола и окислы приводят к формированию на всех теплообменных поверхностях внутри топочных камер буферных слоев (зола прикипает, а окислы сильно разъедают металлические поверхности). Такие буферные слои значительно снижают теплопередачу. Как следствие, в несколько раз снижается тепловой поток (по сравнению с начальными условиями, пока указанный буферный слой не сформировался). Чем дольше котел эксплуатируется, тем заметнее данное снижение. Уже через несколько недель эксплуатации тепловосприятية экранных трубопроводов ухудшается вследствие налипания на их поверхность летучей золы на 20–30 %.

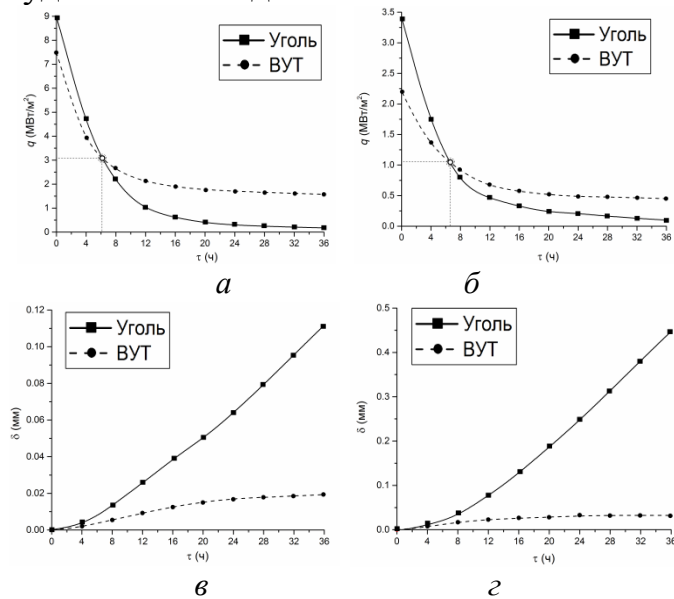


Рис. 11. Результаты численных оценок изменения в течение времени эксплуатации теплового потока к воде, нагреваемой в экранных трубах топочной камеры (а) и трубках экономайзера (б) дымовыми газами, при использовании разных видов топлив, а также соответствующая этому времени эксплуатации толщина золowych отложений (в, г)

На рис. 11 представлены результаты выполненных оценок тепловых потоков на примере экранной трубки камеры сгорания и трубки экономайзера при сжигании угля в традиционном виде (пыли) и при использовании суспензии ВУТ. Тепловой поток вычислен по известной формуле $q = \lambda(T_s - T_w) / \delta$, где δ – толщина стенки (2 мм), T_s – температура дымовых газов (для угля принималась равной 700 °С, а в случае ВУТ 600 °С с целью учета снижения температуры вследствие испарения воды), T_w – температура пароводяной смеси (принималась средней и составляла 100 °С), λ – коэффициент теплопроводности материала стенки (для стали 30 Вт/(м·К). На рис. 10 значения q в начальное время отражают тепловые потоки в идеальных условиях, т.е. без учета налипания на стенки летучей золы.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований позволяют прогнозировать (рис. 12) условия и характеристики экологически, экономически и энергетически выгодной утилизации большой группы отходов углеобогащения, нефтепереработки, лесопиления, деревопереработки, сельского хозяйства, коммунального сектора для выработки тепловой и электрической энергии на ТЭС. Так по данным международных отчетов (BP Statistical Review of World Energy, 2017; International Energy Agency. Key world energy statistics. 2017) в 2016–2018 гг. ежегодно вырабатывалось в среднем 24816 ТВт электроэнергии.

Доля угля в производстве электроэнергии составила 39,3 % или 9678 ТВт. На энергетические нужды затрачивается не менее 70 % угля, зная объемы его ежегодного извлечения (≈ 5.484 млн. т. можно оценить количество угля, необходимое для выработки такого количества энергии – около 3838 млн. т. В то же время, согласно минимальным оценкам, количество отходов углепереработки, образующихся в процессе обогащения, составляет 10-12 % от общего объема угля. В первом приближении это ≈ 460 млн. т. в год. Если принять, что сжигая 3838 млн. т. угля вырабатывается 9678 ТВт, то при использовании 460 млн т. ВУТ на основе фильтр-кека можно будет произвести примерно 464 ТВт энергии (с условием того, что фильтр кека нужно до 2,5-3 раз больше, чем угля). Для органоводоугольных суспензий, расход которых меньше, чем у ВУТ (за счет большей теплоты сгорания) можно спрогнозировать выработку энергии на уровне 773 ТВт.

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

Основные результаты и выводы

1. В ходе экспериментов установлено, что сжигание суспензионных топлив из фильтр-кеков каменных углей снижает образование оксидов серы на 76 % и азота на 75 %, а для ОВУТ этот показатель составляет 68 % и 55 %, соответственно, по сравнению с углем.
2. Выявлено, что на концентрации антропогенных выбросов существенное влияние оказывает соотношение массовых долей угольного компонента, воды и горючей жидкости (концентрации SO_x и NO_x изменяются в диапазоне от 20 до 60 %). Незначительное влияние оказывают тонина помола угля, способ приготовления и масса подаваемого в модельную камеру сгорания топлива (диапазон изменения составляет от 2,5 до 15 %). Таким образом, лабораторные измерения концентраций дымовых газов можно проводить с различными массами навесок суспензий и при применении разных технологий приготовления последних.
3. Концентрации основных антропогенных выбросов, полученных при сжигании ОВУТ с древесными и растительными добавками, соответствуют диапазонам 10–120 ппм для окислов серы и 15–300 ппм для оксидов азота, что до 3 раз ниже, чем для угля, и до 1,5 раз ниже, чем для ОВУТ без соответствующих добавок.
4. Использование лесных (лиственный и хвойный опад) отходов снижает концентрации окислов серы до 5 раз, оксидов азота до 2 раз (в зависимости от

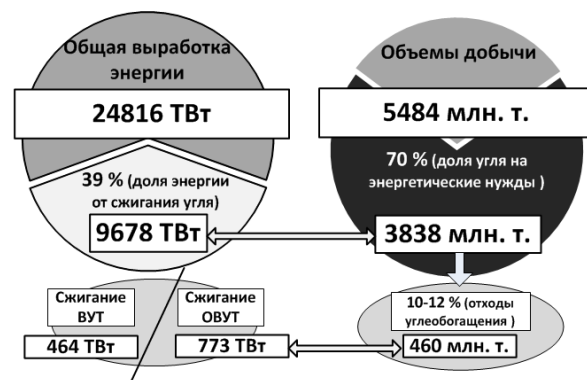


Рис. 12. Прогностические оценки количества вырабатываемой энергии при сжигании ВУТ или ОВУТ на ТЭС с учетом их сжигания в 2016-2018 гг. в мире

выбранной концентрации и температурных условий сжигания топлив) в сравнении с углем, либо ОВУТ без добавок.

5. Выполненные эксперименты показали, что для суспензий ОВУТ на основе фильтр-кеков с добавками маслосодержащих отходов переработки растительного сырья экологические показатели сжигания значительно выше, чем для ОВУТ с отработанным турбинным маслом. Образование окислов серы во всем интервале температур сжигания уменьшилось при добавке рапсового масла на 23–45 %, а концентрации оксидов азота могут быть снижены на 63–78 %.
6. Установлена возможность рационального использования наиболее типичных отходов предприятий нефтехимической, нефтедобывающей, пищевой промышленности и коммунального сектора в составе органоводоугольных топливных композиций. В зависимости от выбранного компонента можно добиться как повышения, так и снижения экологических показателей сжигания топлив. Так, в сравнении с фильтр-кеком концентрации окислов серы для состава с 10 % этилового спирта увеличились на 45–85 %, в то время как добавление 10 % яичной скорлупы или ила снижает SO_x на 5–50 %. Добавление 10 % этилового спирта способствовало росту NO_x на 5–70 %. При использовании скорлупы или ила оксиды азота могут быть снижены на 5–47 %.
7. С течением времени тепловые потоки от продуктов сгорания топлив к водяным экономайзерам котлов ТЭС становятся сопоставимыми для условий сжигания углей, суспензий ВУТ и ОВУТ. Поэтому значения всех основных энергетических индикаторов становятся близкими при сжигании углей и топливных суспензий. По экологическим и экономическим критериям суспензионные водосодержащие топлива из отходов нефтепереработки, углеобогащения, деревопереработки, лесопиления, переработки растительного сырья более перспективны.
8. При обобщении результатов исследований предложены три алгоритма прогнозирования перспективности применения суспензионных топлив из рассмотренных компонентов на ТЭС вместо угля. Учтены наиболее значимые характеристики топлив и условий их сжигания на ТЭС: теплотворная способность, зольность, стоимость, концентрации антропогенных выбросов.
9. Рассчитанный комплексный критерий $D_{relative}$, учитывающий теплотворную способность, стоимость и экологические показатели, может меняться в широком диапазоне (до 165) в зависимости от свойств биомассы или других исследованных добавок. Использование растительных отходов дает возможность утилизировать накопившиеся отходы сельскохозяйственной промышленности, снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, повысить реологические и теплофизические характеристики топлива.
10. Введены обобщающие критериальные выражения, учитывающие экологические, энергетические и технико-экономические характеристики сжигания топлив. Сравнительный анализ относительных показателей полезного использования традиционных и перспективных топлив ТЭС показал высокие приоритеты суспензионных топлив. Разработаны рекомендации по использованию результатов исследований при планировании программ замены угля на современных ТЭС или

при проектировании новых станций для сжигания суспензионных топлив из отходов углеобогащения, нефтепереработки, растительных добавок, шламов и других рассмотренных компонентов. Основное внимание уделено сравнительному анализу перспективности применения таких топлив в разных регионах мира.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Nyashina G.S.** The influence of droplet sizes of coal-water slurry containing petrochemicals on integral ignition characteristics / G.S. Nyashina, A.G. Kosintsev, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak // **JP Journal of Heat and Mass Transfer**. – 2016. – V. 13. – P. 265–276.
2. **Nyashina G.S.** Environmental Potential of Using Coal-Processing Waste as the Primary and Secondary Fuel for Energy Providers / G.S. Nyashina, J.C. Legros, P.A. Strizhak // **Energies**. – 2017. – V.10, № 3. – P. 405.
3. **Няшина Г.С.** Анализ антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив и отходов углепереработки / Г.С., Няшина, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак // **Кокс и химия**. – 2017. – № 4. – С. 40–46.
4. **Няшина Г.С.** Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий / М.А. Дмитриенко, Г.С., Няшина, Н.Е. Шлегель, С.А. Шевырев // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики**. – 2017. – Т. 19. – № 3–4. – С. 41–52.
5. **Няшина Г.С.** Снижение выбросов при сжигании углей, водоугольных и органоводоугольных топлив / Г.С., Няшина, Н.Е. Шлегель, С.Ю. Лырщиков // **Химия твердого топлива**. – 2017. – № 6. – С. 26–32.
6. **Nyashina G.S.** Environmental indicators of the combustion of prospective coal waterslurry containing petrochemicals / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Journal of Hazardous Materials**. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.
7. **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.
8. **Nyashina G.S.** 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.
9. **Няшина Г.С.** 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.
10. **Nyashina G.S.** Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal / G.S. Nyashina, K.Yu. Vershinina, M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak // **Journal of Hazardous Materials**. – 2018. – V. 347. – P. 359–370.
11. **Nyashina G.S.** The influence of liquid plant additives on the anthropogenic gas emissions from the combustion of coal-water slurries/ G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // **Environmental Pollution**. – 2018. – V. 242 – P. 31–41.