

На правах рукописи



**СИДОРКИН
Владимир Тимофеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ
ПОБОЧНЫХ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ
СЛАНЦЕПЕРЕРАБОТКИ
В КОТЛАХ ТЭС**

Специальность 05.14.14 – «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Москва
2016**

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»).

Научный руководитель:

Тугов Андрей Николаевич – доктор технических наук, заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств электростанций ОАО «ВТИ».

Официальные оппоненты:

Григорьев Константин Анатольевич – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Открытого акционерного общества «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»);

Зройчиков Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий отделением технологий использования топлив и экологии энергетики Открытого акционерного общества «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН»).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»).

Защита состоится «17» ноября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.222.001.01 при ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ») по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организаций, просим направлять по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ».

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.222.001.01,
доктор технических наук

 П. А. Березинец

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Горючие сланцы принято считать низкосортным топливом из-за невысокой теплоты сгорания (8,0–9,5 МДж/кг), большого содержания золы и серы. Прямое сжигание сланцев в энергетических котлах связано со значительными эксплуатационными расходами и сопровождается значительными выбросами вредных веществ с дымовыми газами. Другим, более экологически безопасным направлением энергетического использования горючих сланцев является их термическая переработка с получением жидкого топлива – сланцевого масла. Это же направление одновременно и экономически более выгодно. Мировые перспективы дальнейшего использования горючих сланцев связывают именно с ним.

Процессы термической переработки сланца достаточно хорошо изучены и отработаны. Например, регулируя температуру пиролиза и аппаратное оформление процесса, можно изменять соотношение между выходом жидких и газообразных продуктов, менять состав сланцевого масла и побочных газообразных продуктов. Вместе с тем, вопросы рациональной утилизации побочных газообразных продуктов сланцепереработки до сих пор не имеют однозначного решения. На данном этапе наиболее распространено сжигание газов сланцепереработки в энергетических котлах для производства электроэнергии. Однако и на этом пути существует много проблем и нерешенных задач. Эксплуатация типовых котлов, приспособленных под сжигание газов сланцепереработки, связана с проблемами в области экологии и надёжности работы горелок и поверхностей нагрева. Режимы совместного сжигания сланца и газов сланцепереработки имеют ограничения по доле газа из-за проблем со шлакованием поверхностей нагрева и по изменению параметров пара, вызванных изменением теплообмена в котле при замещении одного топлива другим. Таким образом, организация

экологически безопасного и эффективного сжигания газообразных продуктов сланцепереработки в энергетических котлах в полном объеме представляется весьма актуальной задачей.

Для России создание установок для термической переработки сланца с получением жидкого топлива и эффективной утилизацией образующихся побочных газообразных продуктов его переработки особенно важно. Разведанные запасы сланца в Ленинградской, Саратовской, Оренбургской и других областях, в республиках Коми, Мордовии, Чувашии и Западной Сибири значительно превышают эстонские.

Актуальность темы подтверждается поддержкой, оказанной работе Министерством образования и науки РФ (проект RFMEF158814X0006).

Целью настоящей работы является разработка мероприятий по повышению эффективности сжигания побочных газообразных продуктов сланцепереработки в существующих и вновь создаваемых котлах с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- изучить состав и свойства газов сланцепереработки с точки зрения использования их как газового топлива;
- по результатам опытно-конструкторских исследований и натурных испытаний разработать основные принципы проектирования горелок для сжигания газообразных побочных продуктов сланцепереработки;
- на основании анализа расчетно-экспериментальных исследований процессов теплообмена и шлакования разработать рекомендации по увеличению доли полукоксового газа при его совместном сжигании в существующих котлах ТЭС;
- оценить воздействие продуктов сгорания на работу хвостовых поверхностей нагрева котлов с позиции низкотемпературной коррозии и разработать рекомендации по повышению их надежности;

- исследовать влияние различных конструктивных и технологических факторов, в том числе таких, как стадийная подача топлива и воздуха и рециркуляция дымовых газов, на процесс образования оксидов азота при сжигании газов сланцепереработки;

- оценить эффективность технологии связывания оксидов серы за счет подачи сорбента в топку при сжигании газов сланцепереработки;

- обобщить опыт эксплуатации котлов, реконструированных для сжигания газов сланцепереработки.

Автором лично получены результаты, обладающие **научной новизной**:

- выполнен комплексный анализ газов сланцепереработки (генераторного и полукоксового газа) с позиции энергетического топлива и определены их основные теплотехнические характеристики;

- получено экспериментальное подтверждение оптимальности конструкций горелок для сжигания генераторного и полукоксового газа, созданных на основе опытно-конструкторских работ и результатов численного моделирования;

- получена совокупность технических, технологических и методических решений по эффективному сжиганию генераторного и полукоксового газа, в том числе, обеспечивающих низкие выбросы NO_x .

Практическая значимость работы заключается в разработке мероприятий и рекомендаций по реконструкции существующих и созданию новых котлов для эффективного сжигания побочных газообразных продуктов сланцепереработки, позволяющих в полном объёме энергетически утилизировать образующиеся в процессе переработки сланца полукоксовый и генераторный газы с минимальными выбросами вредных веществ в атмосферу.

Методы исследования: лабораторный и промышленный эксперимент, численное моделирование и методы математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

- рекомендации по реконструкции существующих и созданию новых котлов для энергетически эффективного сжигания газообразных побочных продуктов сланцепереработки с экологически безопасными выбросами вредных веществ в атмосферу;
- определенные характеристики полукоксового и генераторного газов и продуктов их сжигания;
- технические решения для проектирования горелок для сжигания газообразных побочных продуктов сланцепереработки;
- зависимости влияния рециркуляции дымовых газов и организации ступенчатого сжигания на образование оксидов азота при сжигании полукоксового газа.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, планировании и организации основных этапов работы.

Диссертанту принадлежат:

- руководство промышленными испытаниями;
- обработка и обобщение экспериментальных данных;
- анализ результатов расчетных исследований;
- разработка рекомендаций по реконструкции существующих и созданию новых котлов для сжигания побочных газообразных продуктов сланцепереработки;
- авторский надзор за реализацией этих рекомендаций на промышленных объектах и обобщение опыта эксплуатации котлов с внедренными разработками.

Часть работ выполнена совместно с сотрудниками отделения парогенераторов и топочных устройств электростанций ОАО «ВТИ», кафедры «Парогенераторостроение» НИУ «МЭИ», Таллиннского технического университета, ENTEH Engineering AS, чье участие отмечено в тексте диссертации.

Достоверность результатов подтверждается:

- удовлетворительным согласованием экспериментальных данных, полученных автором, с известными из литературных источников и с результатами численного моделирования;
- согласованием показаний приборов экспериментального контроля со показаниями штатных приборов на котле;
- использованием поверенной современной измерительной аппаратуры;
- применением апробированных программных пакетов Boiler Designer и Ansys CFX;
- использованием наиболее проверенных для решаемых задач математических моделей.

Внедрение

Результаты работы внедрены на котлах БКЗ-75-39ФСл (ст. № 5–8) Северной электростанции в г. Кохтла-Ярве, входящей в состав фирмы «VKG ENERGIA OÜ», котле ТП-101 Эстонской ЭС (ст. № 2А), котлах Е-25 и ТС-35 (ст. № 1, 2, 4 и 5) теплоэлектростанции предприятия KIVIÕLI KEEMIATÖÖSTUS OÜ в г. Кивиыли, использованы в проекте котла Е-135-3,2-420ДГ, изготовленного котельным заводом «Белэнергомаш-БЗЭМ» для VKG ENERGIA OÜ, и при проектировании и изготовлении шести двухтопливных горелок для этого котла.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Международной научно-практической конференции «Boiler Designer–2014» «Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования» (Москва, 2014 г.);

- II и III Международных научно-технических конференциях «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла» (Москва, 2015 г. и 2016 г.);
- X и XI Международных научно-практических конференциях «Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии» (Москва, 2014 г., 2015 г.);
- VIII Международном симпозиуме по сжиганию угля (Пекин, 2015 г.);
- VII Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики – 2015» (Москва, 2015 г.);
- VII Балтийской конференции по теплообмену (Таллинн, 2015 г.);
- Международной конференции «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике» (Казань, 2015 г.);
- IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015 г.).

Публикации

По теме диссертации имеется 18 публикаций, в том числе 5 статей в журналах из перечня ВАК и 3 патента (Российской Федерации и Эстонской Республики) на полезную модель.

Структура и объём

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 112 наименований и 3 приложений, содержит 151 страницу машинописного текста, включая 31 рисунок и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены процессы термической переработки сланца, их параметры и выход целевых продуктов, анализируется основной способ утилизации побочных газообразных продуктов сланцепереработки – сжигание в энергетических котлах, определены эксплуатационные и экологические проблемы этого направления утилизации.

В настоящее время в мире и в Эстонии, в частности, термическая переработка сланца в промышленных масштабах ведётся на установках с газовым и твёрдым теплоносителем, основу которых составляют процессы KIVITER и GALOTER. В ходе процесса, известного как KIVITER, крупнокусковой сланец (размер кусков 25–100 мм) загружается в шахтные газогенераторы и продувается поперечным потоком газового теплоносителя. Основным продуктом процесса является сланцевое масло, а в качестве побочного продукта образуется генераторный газ. Теплота сгорания генераторного газа невысока и составляет 2,78–4,28 МДж/м³, а выход газа – 420–480 м³ на тонну сланца. Отличительная особенность генераторного газа – наличие большого количества балласта в виде азота (N₂) и диоксида углерода (CO₂). При реализации процесса GALOTER перерабатывается мелкозернистый сланец (размер кусков 0–25 мм). В качестве теплоносителя используется зола от сжигания твёрдых остатков пиролиза, а весь процесс пиролиза протекает во вращающейся реторте. В данном процессе основным продуктом является также сланцевое масло, а побочным – полукоксовый газ, который иногда называют ретортным. Низшая теплота сгорания полукоксового газа достаточно высока 33,5–54,5 МДж/м³, выход газа составляет 40–50 м³ на тонну сланца.

Сейчас и на ближайшую перспективу наиболее рациональным направлением утилизации побочных газообразных продуктов сланцепереработки считается их сжигание в паровых котлах тепловых электростанций, входящих в состав сланцеперерабатывающих предприятий или расположенных рядом. До настоящего времени для этого реконструировали существующие сланцевые котлы. В качестве горелочных устройств использовались аналоги для сжигания подобных газов, например, из металлургической промышленности (доменный газ), или разрабатывали индивидуальные конструкции горелок.

На основании анализа опыта эксплуатации реконструированных котлов определены некоторые проблемные вопросы, сопровождающие сжигание газов сланцепереработки в них. Это вопросы эффективной работы горелочных устройств и контроля режимов их работы с учётом специфических свойств газов; проблемы, связанные с повреждениями труб хвостовых поверхностей нагрева из-за низкотемпературной сернистой коррозии; шлакование топочных экранов и пароперегревателя при совместном сжигании газа и сланца и вопросы экологии.

Намечены основные направления исследований, результаты которых будут способствовать решению указанных проблем и послужат основой для разработки рекомендаций по организации эффективного сжигания газов сланцепереработки в новых и реконструируемых котлах.

Во второй главе определены основные топливные характеристики побочных газообразных продуктов сланцепереработки, необходимые для проектирования горелочных устройств и расчётов процессов горения и теплообмена в котлах, а также выполнен анализ свойства дымовых газов, образующихся в процессе их сжигания.

В генераторном газе доля горючих компонентов составляет около 16 %, доля балласта около 84 %. Основными компонентами горючей части являются водород и монооксид углерода, также присутствуют метан, предельные и непредельные углеводороды и сероводород (рисунок 1).

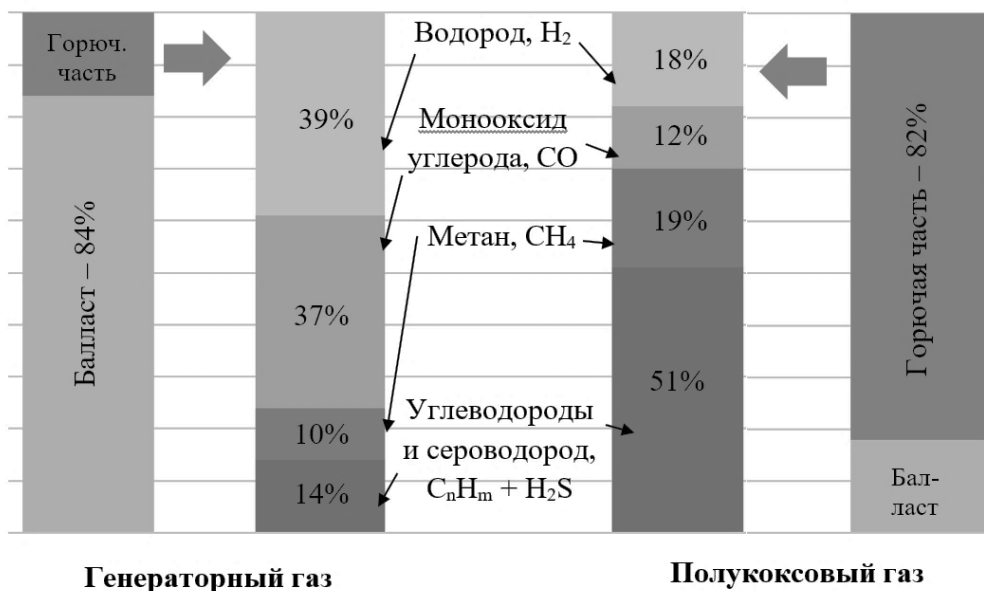


Рисунок 1 – Состав генераторного и полукоксового газа

Содержание сероводорода в генераторном газе может составлять 0,23–0,54 %. В газе может содержаться до 25 г/м³ конденсированных фракций, которые называют газовым бензином и которые могут повышать теплоту сгорания газа примерно на 20–25 %. Для генераторного газа среднего состава теоретически необходимый объем воздуха для сжигания составляет 0,83 м³/м³, а теоретический объем продуктов сгорания – 1,81 м³/м³.

Состав полукоксового газа отличается от состава генераторного газа в первую очередь существенно меньшим количеством балластных компонентов и соответственно значительно более высокой теплотой сгорания. Основными компонентами полукоксового газа являются предельные и непредельные углеводороды суммарным количеством около 50 %, а также примерно в равных пропорциях водород, монооксид углерода и метан (см. рисунок 1). Содержание сероводорода в полукоксовом газе находится в пределах 0,87–3,30 % и существенно зависит от технологических параметров процесса пиролиза. При определенных условиях содержание H₂S в газе может снижаться до 0,1–0,2 %. Установлена связь между содержанием H₂S и CO₂ в полукоксовом газе. Для полукоксового газа среднего состава теоретически необходимый объем воздуха для сжигания составляет 11,30 м³/м³, а продуктов сгорания – 12,71 м³/м³. В газе могут содержаться газбензиновые конденсированные фракции до 150–250 мг/м³, повышающие теплоту сгорания газа на 15–25 %.

Определены адиабатические температуры горения генераторного и полукоксового газа в холодном воздухе при стехиометрическом соотношении топлива и воздуха и без учета диссоциации продуктов сгорания: 1250–1300 °С и 2090–2135 °С соответственно. Важно отметить, что для полукоксового газа адиабатическая температура на 60–100 °С выше, чем аналогичная величина для метана.

Выполнена расчётная оценка нормальной скорости распространения пламени при сжигании газообразных продуктов сланцепереработки. Для полукоксового газа она составляет не менее 42 см/с, что выше аналогичной величины для метана (37–39 см/с). Из-за большого содержания балласта в генераторном газе (до 84 % по объёму) максимальная скорость распространения пламени составляет всего 13 см/с. Установлено, что для хорошего горения генераторного газа необходимо повышение скорости, как минимум, до 30 см/с. Поэтому требуется сжигать этот газ в горячем воздухе с температурой 220–250 °С.

Рассчитаны пределы взрываемости газов сланцепереработки. Нижний предел взрываемости генераторного газа находится на уровне 24–26 %; верхний предел – 76–79 %. Нижний предел взрываемости полукоксового газа составляет 3,6–4,5 %, а верхний – 19,3–24, %, тогда как нижний и верхний пределы взрываемости метана – 4,9 % и 15,0 % соответственно. При таких более широких пределах взрываемости полукоксового газа следует ожидать более легкого воспламенения и стабильного горения в наиболее широком диапазоне избытков воздуха по сравнению с природным газом, что и подтверждается на практике.

Показано влияние температуры горячего воздуха и содержания кислорода (для случая подачи рециркуляции в дутьевой воздух) на пределы взрываемости смесей газов с воздухом.

Определены числа Воббе для обоих газов, которые для полукоксового газа составляют 43,9–54,4 МДж/м³, для генераторного газа – 3,7–4,0 МДж/м³. (Для справки: число Воббе для природного газа равно 46,0–48,2 МДж/м³). Сопоставление и анализ указанных чисел показывают, что применение типовых горелок

природного газа для сжигания генераторного газа абсолютно неприемлемо, а для полукоксового – допустимо.

Определены безразмерные топливные характеристики газов β , которые связывают элементный состав горючих газов с составом продуктов сгорания и важны для расчетов коэффициентов избытка воздуха при горении. Для генераторного газа $\beta = 0,113$, а для полукоксового газа $\beta = 0,407–0,500$ (в сравнении для метана $\beta = 0,79$).

В зависимости от концентрации сероводорода в горючих газах соответствующие концентрации диоксида серы SO_2 в продуктах сгорания этих топлив могут составлять 3390–7950 мг/м³ для генераторного газа и 1740–6620 мг/м³ для полукоксового газа (в пересчете на сухой газ при 3 % O_2).

Температура точки росы в продуктах сгорания обоих горючих газов определялась экспериментально прибором Lancom 200 и сравнивалась с расчётными значениями по различным методикам. Для обоих газов экспериментальные и расчётные значения находятся в температурном интервале 130–140 °С. Из сопоставления экспериментальных и расчётных значений температуры точки росы установлено, что степень конверсии диоксида серы в триоксид (SO_2 в SO_3) в продуктах сжигания обоих газов составляет 0,3–1,7 % (в среднем около 1,0 %).

В обоих газах присутствует молекулярный азот в разных пропорциях, но практически полностью отсутствует азот в соединении с углеводородными компонентами («топливный» азот). Это определяет преимущественное образование только «термических» и «быстрых» оксидов азота (NO_x) при сжигании обоих горючих газов. Для полукоксового газа можно ожидать более высокого уровня образования оксидов азота, чем при сжигании природного газа, из-за более высокой температуры горения этого газа при прочих равных условиях.

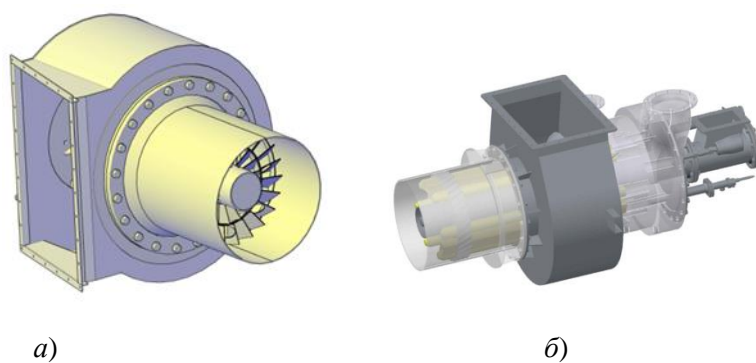
В третьей главе анализируются особенности разработанных и внедренных конструкций горелок для сжигания генераторного и полукоксового газа с позиции надежности их работы и применимости для различных технологий сжигания, а также рассматриваются особенности использования разных методик контроля режимов работы горелок и котла в целом с учетом специфических свойств газов.

Для сжигания генераторного газа предложено использовать модифицированные прямоточные дубль-горелки с теплоизолированным предтопком с соотношением объёма предтопка, в котором происходит стабилизация воспламенения газа, к мощности горелки в пределах 0,13–0,15 м³/МВт. Горелки обеспечивают стабильное горение при колебаниях теплоты сгорания газа в пределах 25–30 % без подсветки более калорийным газом.

При проектировании горелочных устройств для сжигания полукоксового газа учитывались его следующие особенности: достаточно хорошее воспламенение и наличие большого количества высокомолекулярных углеводородов как в газообразном, так и в конденсированном состоянии. Для сжигания полукоксового газа предложено использовать горелки двух конструктивных исполнений – конструкции с одной центральной газораздаточной трубой и конструкции с пилотной горелкой в центральной части и с газораздаточными трубами в периферийной части. Горелки первого типа более просты в изготовлении и эксплуатации, подходят для мощностей до 15 МВт. Горелки второго типа могут иметь мощность более 15 МВт, работать с подачей дымовых газов рециркуляции в периферийный воздух, а также имеют более универсальную регулировку по газу и воздуху, обеспечивают меньшие выбросы оксидов азота. В обоих типах горелок возможно различное исполнение части подвода воздуха на горение – полностью прямоточное, с осевым завихрителем воздуха в центральной части и в пилотной горелке, с осевым завихрителем на всё сечение. Оба типа горелок пригодны для использования в технологиях сжигания полукоксового газа с низкими выбросами оксидов азота (сжигание с рециркуляцией, стадийное сжигание).

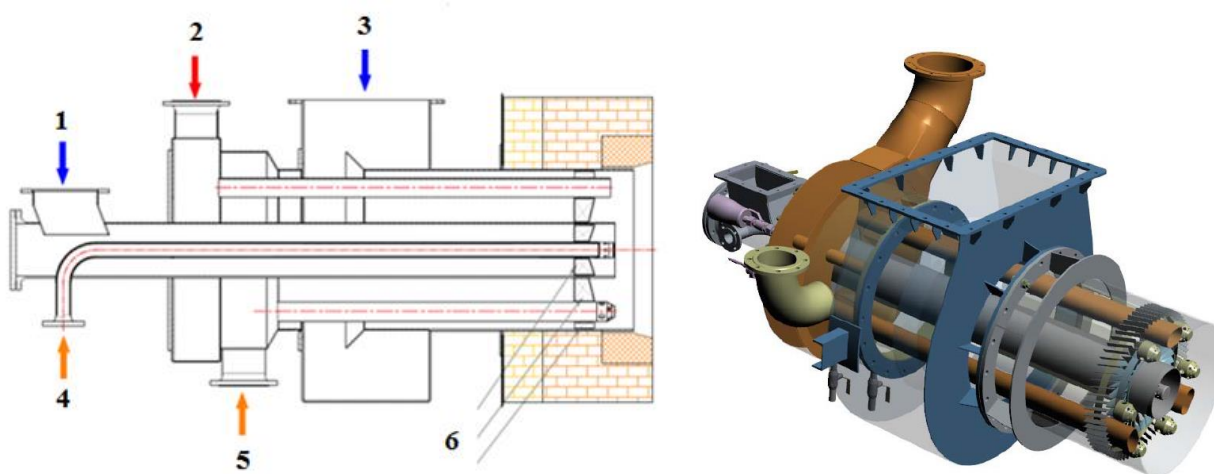
Примеры конструктивного исполнения горелок полукоксового газа обоих типов приведены на рисунке 2.

Все типы горелок прошли промышленную апробацию на действующих котлах (горелки генераторного газа – с 2004 г., горелки полукоксового газа – с 2010 г.). К настоящему времени в эксплуатации находятся 14 горелок генераторного газа на котлах БКЗ-75-39 и ТС-35 и 22 горелки полукоксового газа на котлах БКЗ-75-39 и ТП-101.



a – конструкция с одной центральной газораздаточной трубой; *б* – конструкция с пилотной горелкой и газораздаточными трубами в периферийной части.

Рисунок 2 – Горелки для сжигания полукоксового газа



1 – центральный воздух; *2* – генераторный газ; *3* – периферийный воздух и дымовые газы рециркуляции; *4* – центральный полукоксовый газ; *5* – периферийный полукоксовый газ; *б* – завихрители.

Рисунок 3 – Двухтопливная горелка (для сжигания полукоксового и генераторного газов) для котла Е-135

На основании обобщения опыта проектирования и эксплуатации горелок была создана универсальная горелка тепловой мощностью 20 МВт для одновременного сжигания полукоксового и генераторного газа (рисунок 3). Котел Е-135 укомплектован шестью такими горелками.

Для снижения выбросов оксидов азота в некоторых разработанных конструкциях горелок для сжигания полукоксового газа применяется рециркуляция дымовых газов. Для контроля режимов работы газовых горелок с рециркуляцией предложено использовать в качестве определяющего параметра вместо коэффициента рециркуляции концентрацию кислорода в окислителе (O_{2cm}), что более удобно к применению для случаев большого (5–8 %) содержания кисло-

рода в дымовых газах рециркуляции ($O_{2\text{рец}}$). При этом контроль расходов воздуха ($Q_{\text{в}}$) и дымовых газов рециркуляции ($Q_{\text{рец}}$) на горелку следует вести по формулам:

$$Q_{\text{в}} = \alpha_{\text{гор}} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot G_{\text{газ}} \cdot \frac{21}{O_{2\text{см}}} \cdot \frac{(O_{2\text{см}} - O_{\text{рец}})}{(21 - O_{\text{рец}})}; \quad (1)$$

$$Q_{\text{рец}} = \alpha_{\text{гор}} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot G_{\text{газ}} \cdot \frac{21}{O_{2\text{см}}} \cdot \frac{(21 - O_{2\text{см}})}{(21 - O_{\text{рец}})}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{гор}}$ – коэффициент избытка воздуха в газовой горелке;
 $V_{\text{в}}^0$ – теоретически необходимое количество воздуха на сжигание газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$;
 $G_{\text{газ}}$ – расход газа на горелку, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для оценки экономичности работы котла (для расчета потерь с уходящими газами) важно корректно оценить значение коэффициента избытка воздуха в продуктах сгорания. Для расчета коэффициента избытка воздуха (α) при сжигании газов сланцепереработки, содержащих заметное количество балласта в виде азота, предложено преобразование азотной формулы с использованием основного уравнения горения и безразмерной топливной характеристики (β):

$$\alpha = \frac{1 - A}{1 - \frac{79}{21} \cdot \frac{O_2(1 + \beta)}{79 + \beta(100 - O_2)} - A}, \quad (3)$$

где комплекс A вычисляется с использованием характеристик топлива и только одного замеренного параметра – объёмной концентрации кислорода в продуктах сгорания (O_2):

$$A = \frac{21 - O_2}{21} \cdot \frac{\beta + 0,79}{79 + \beta(100 - O_2)} \cdot \frac{100 \cdot N_2^{\text{топ}}}{N_2^{\text{топ}} + 79 \cdot V_{\text{в}}^0}, \quad (4)$$

где $N_2^{\text{топ}}$ и $V_{\text{в}}^0$ – содержание азота в топливе и объем сухого воздуха, необходимого для полного сгорания топлива.

Для приближенных вычислений коэффициента избытка воздуха (с погрешностью не более 4 % относительных) при сжигании генераторного газа можно использовать простую формулу:

$$\alpha = \frac{21 + O_2}{21 - O_2}, \quad (5)$$

а для расчета смесей генераторного и полукоксового газа – формулу:

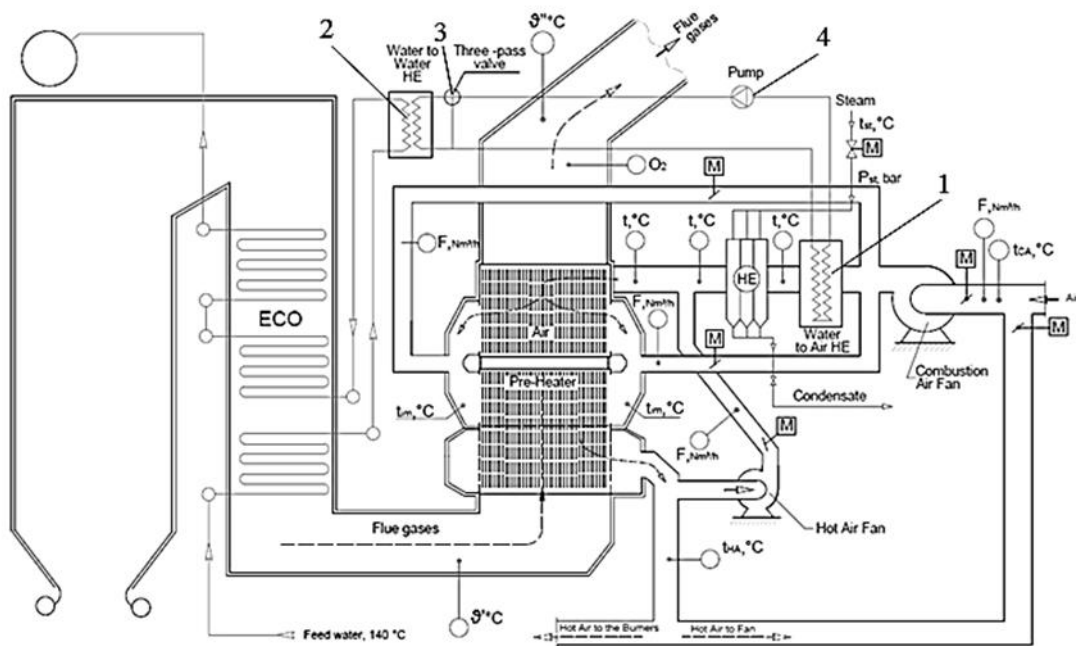
$$\alpha = \frac{21 + q \cdot O_2}{21 - O_2}, \quad (6)$$

где q – относительная доля генераторного газа в смеси по теплу (q меняется от 0 до 1).

В четвертой главе предложены мероприятия для повышения надежности работы хвостовых поверхностей нагрева котлов при сжигании побочных газообразных продуктов сланцепереработки и для предотвращения шлакования (загрязнения) поверхностей нагрева топки и пароперегревателя при совместном сжигании сланца и газов сланцепереработки.

Для предотвращения низкотемпературной коррозии холодного пакета трубчатого воздухоподогревателя (ТВП) при одновременном сохранении низкой температуры уходящих газов предложено каскадное распределение потоков воздуха по пакетам воздухоподогревателя, принудительная рециркуляция горячего воздуха и предварительный подогрев воздуха в паровом калорифере. На основании результатов расчетных исследований по оптимизации конструктивно-режимных факторов, влияющих на конструкцию ТВП с позиции надёжности и экономичности, представлены три модификации подачи воздуха в ТВП, реализованные на реконструированных котлах БКЗ-75-39 Северной ЭС предприятия «VKG Energia OÜ».

Для дальнейшего усовершенствования схемы подогрева воздуха на котлах, сжигающих два вида топлива с существенно разной теплотой сгорания (как, например, генераторный и полукоксовый газ), предложена комбинация парового и экономайзерного подогрева воздуха перед ТВП.



1 – водяной калорифер; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – трехходовой кран; 4 – насос.

Рисунок 4 – Схема комбинированного предварительного прогрева воздуха перед ТВП с использованием тепла экономайзера, парового калорифера и рециркуляции горячего воздуха

На рисунке 4 представлена схема комбинированного подогрева воздуха перед ТВП с использованием тепла экономайзера, парового калорифера и рециркуляции горячего воздуха.

Процессы шлакования и теплообмена при совместном сжигании полукоксового газа и сланца исследовались на котле ТП-101 Эстонской ЭС (г. Нарва). Установлено, что с увеличением доли полукоксового газа в общем топливном балансе происходит ощутимый рост температур (как адиабатической, так и температуры на выходе из топки) и, следовательно, эффективной температуры факела, что существенно повышает вероятность шлакования экранных поверхностей топки.

Показано, что из-за перераспределения тепловосприятий между отдельными поверхностями нагрева, связанного с изменением теплообмена, доля сжигаемого полукоксового газа в котле ТП-101 ограничивается 7–20 % (в зависимости от теплоты сгорания сланца).

Для дальнейшего увеличения доли сжигаемого полукоксового газа предложено осуществить рециркуляцию дымовых газов в топку через газовые горелки, что позволяет приблизить характер протекающих процессов теплообмена к условиям работы котла в чисто сланцевом режиме.

При помощи математического моделирования по программе Boiler Designer было установлено, что в режимах с рециркуляцией продуктов сгорания приемлемые параметры котла во всем возможном диапазоне изменения теплоты сгорания сланца (7,10–9,50 МДж/кг) и на всех нагрузках могут быть обеспечены при доле полукоксового газа вплоть до 40 %. В этом предельном случае доля рециркуляции составляет примерно 10–12 %.

Для экспериментального подтверждения полученных результатов расчетных исследований была выполнена реконструкция одного корпуса котла ТП-101 Эстонской ЭС (ст. № 2А) паропроизводительностью 320 т/ч как пилотного проекта с установкой шести горелок для сжигания полукоксового газа (тип горелки представлен на рис. 2, б) суммарной мощностью 40 % тепловой мощности корпуса, и системы рециркуляции дымовых газов. Результаты экспериментов, выполненных на этом котле, подтвердили обоснованность применения рециркуляции для исключения процессов шлакования поверхностей нагрева котла.

В пятой главе приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований процессов, направленных на снижение выбросов SO_2 и NO_x при сжигании полукоксового и генераторного газов.

В горелках для сжигания полукоксового газа, которые представлены на рисунках 2 и 3, использованы конструктивные решения, направленные на уменьшение образования оксидов азота (внутренняя рециркуляция дымовых газов к корню факела, растянутый по длине факел, позонное подмешивание воздуха на горение по длине факела, распределенный подвод газа по сечению горелки). Однако сами по себе горелки не обеспечивают необходимого снижения концентрации до нормативных значений и должны применяться в комби-

нации с другими методами – организацией ступенчатого сжигания и рециркуляцией дымовых газов.

Внедрение ступенчатого сжигания и стадийной подачи топлива по ярусам горелок при сжигании полукоксового газа на четырёх реконструированных котлах БКЗ-75-39Ф показало, что можно добиться снижения содержания NO_x в дымовых газах до 145–300 мг/м³.

Компьютерным моделированием процессов смешения, воспламенения и выгорания полукоксового газа, а также процессов образования оксидов азота на различных стадиях горения топливно-воздушной смеси установлено существенное влияние рециркуляции дымовых газов на снижение концентрации оксидов азота в факеле газовых горелок. Подача дымовых газов рециркуляции в газовые горелки была реализована на реконструированном котле ТП-101 Эстонской ЭС (ст. № 2А). Результаты измерений концентраций оксидов азота в дымовых газах при совместном сжигании сланца и полукоксового газа на этом котле оказались ниже, чем при сжигании только сланца, что свидетельствует о более низком уровне образования NO_x в газовых горелках.

Пересчитанные концентрации NO_x в продуктах сгорания газовых горелок приведены на рисунке 5.

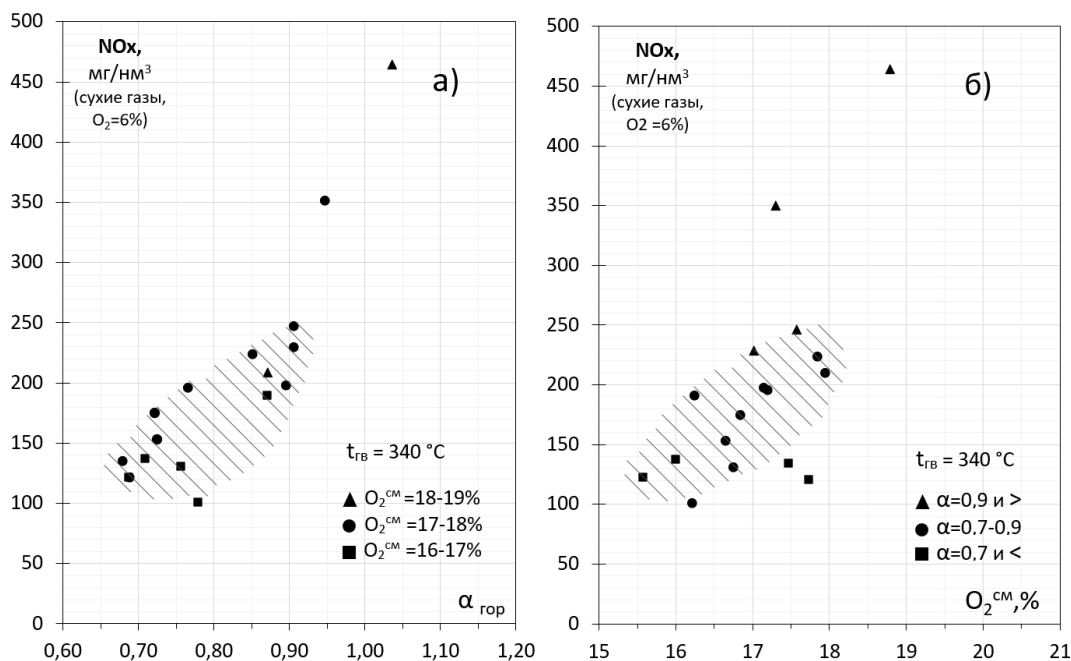


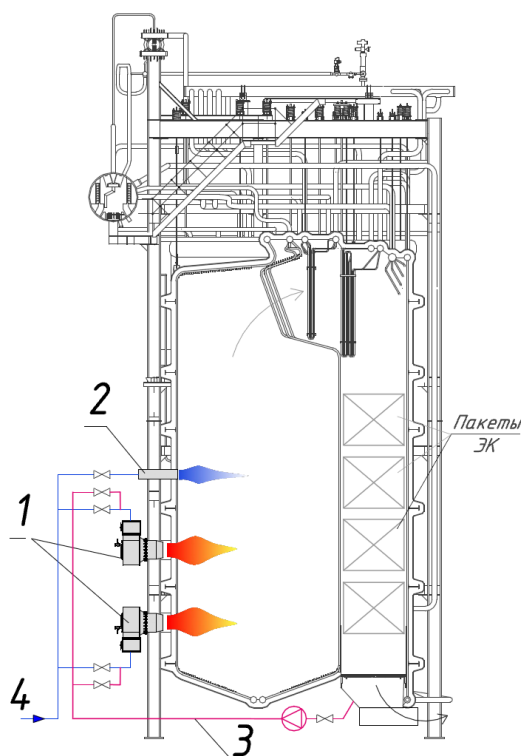
Рисунок 5 – Экспериментальные данные на котле ТП-101 по концентрациям NO_x в продуктах сгорания полукоксового газа в зависимости от избытка воздуха в горелке $\alpha_{гор}$ (а) и содержания кислорода в окислителе $\text{O}_{2см}, \%$ (б)

Проведенные исследования и результаты, полученные на котле ТП-101, показывают, что при сжигании полукоксового газа с избытками воздуха в разработанных горелках до 0,7–0,8 и пониженном вследствие рециркуляции до 15,5–17,5 % содержании кислорода в дутьевом воздухе, по концентрациям NO_x в продуктах сгорания могут быть обеспечены самые жёсткие нормативные требования – вплоть до 100 мг/м^3 .

Отмеченные мероприятия реализованы на котле Е-135 (рисунок 6), который изготовлен для замещения демонтированного котла ст. № 4 Северной электростанции в г. Кохтла-Ярве, входящей в состав фирмы «VKG ENERGIA OÜ».

Для снижения выбросов оксидов серы исследовалась технология подачи сорбента в топку котла.

Результаты стендовых испытаний и испытаний на котлах показывают, что метод подходит для генераторного газа, поскольку из-за низких температур пламени не происходит оплавления поверхности частиц известняка при декарбонизации и уменьшения реакционной поверхности сорбента.



1 – горелки для одновременного сжигания полукоксового и генераторного газа; 2 – третичный воздух; 3 – дымовые газы рециркуляции; 4 – общий воздух на горение.

Рисунок 6 – Схема технологии снижения выбросов оксидов азота при сжигании полукоксового и генераторного газа на котле Е-135

Степень связывания серы может находиться в пределах 55–75 % при мольном соотношении $\text{Ca/S} = 2/3$ для условий хорошего перемешивания продуктов сгорания и сорбента, при оптимальных температурных условиях и достаточном времени пребывания в зоне оптимальных температур. Однако при сжигании генераторного и полукоксового газа полного выполнения экологических норм только за счёт этого метода невозможно по причине его ограниченной эффективности. Метод может применяться на котлах при сжигании газов с низким исходным содержанием серы (например, полукоксового газа с ENEFIT-280) и достаточно мягкими требованиями к выбросам диоксида серы (до 400–800 мг/м³), а также в комбинации с установками десульфуризации. В последнем случае в топке происходит декарбонизация известняка и частичное связывание диоксида серы, а основное связывание диоксида серы идет в установке десульфуризации, в которой в качестве реагента используется отоженная в топке известь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Оптимальным решением энергетической утилизации побочных газообразных продуктов сланцепереработки на данный момент является их сжигание в котлах ТЭС.

2. Определены необходимые для проектирования горелочных устройств и котла в целом основные теплотехнические характеристики генераторного и полукоксового газов (теплота сгорания и расходы воздуха на их сжигание, температуры горения, пределы взрываемости, скорости распространения пламени, температура точки росы дымовых газов, безразмерная топливная характеристика) и исследованы свойства продуктов их сгорания. Измерены уровни концентраций оксидов азота и серы, которые при сжигании полукоксового газа составляют соответственно $\text{NO}_x = 600\text{--}750$ и $\text{SO}_2 = 1740\text{--}6620$ мг/м³, а при сжигании генераторного газа – $\text{NO}_x = 35\text{--}50$ и $\text{SO}_2 = 3390\text{--}7950$ мг/м³.

3. Предложены ключевые принципы проектирования горелок для сжигания полукоксового и генераторного газов. На их основе разработаны две основные модели горелок – с центральной газораздаточной трубой и с несколькими газораздаточными трубами по сечению горелки, каждая из которых имеет ряд модификаций, отличающихся способом подачи воздуха на горение, возможностью подачи дымовых газов рециркуляции и др. Основные технические решения прошли промышленную апробацию на действующих котлах (всего изготовлено и установлено на различных котлах около 50 горелок разной модификации).

4. Предложена модификация «азотной» формулы расчета коэффициента избытка воздуха для котлов, сжигающих газы сланцепереработки. Разработана методика контроля режимов работы горелок с рециркуляцией дымовых газов.

5. Исследованы и решены основные проблемы сжигания побочных газообразных продуктов сланцепереработки в энергетических котлах, каковыми являются зашлаковка поверхностей нагрева при совместном сжигании газа и сланца и коррозия хвостовых поверхностей нагрева из-за высокой температуры точки росы, которая для продуктов сжигания этих газов составляет 130–140 °С.

6. Предложены внутритопочные (первичные) мероприятия, позволяющие путём рециркуляции дымовых газов в горелки в комплексе с организацией стадийной подачи окислителя и топлива в 4–6 раз снизить концентрацию оксидов азота (до нормативных значений $\text{NO}_x = 100 \text{ мг/м}^3$).

7. Для достижения нормативных значений по выбросам серы требуется установка систем десульфуризации уходящих газов. Исследуемая в работе технология подачи сорбента в топку котла может быть использована только в исключительных случаях, когда допустимые нормативы для конкретных установок достаточно высоки.

8. Обобщены и изложены рекомендации по учету особенностей сжигания газов сланцепереработки при проектировании новых газовых котлов и при реконструкции существующих сланцевых котлов. Опыт работы котлов на эстонских электростанциях с уже внедренными рекомендованными мероприятиями показал их обоснованность.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК:

1. **Сидоркин, В.Т.** Опыт реконструкции котлов БКЗ-75-39 ФСл для сжигания продуктов сланцепереработки [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, В.М. Супранов [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 2. – С. 68–70.

2. **Сидоркин, В.Т.** Оценка возможности сжигания побочных продуктов сланцепереработки в котле ТП-101 [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, В.А. Верещетин, Д.А. Мельников // Теплоэнергетика. – 2015. – № 4. – С. 43–49.

3. **Сидоркин, В.Т.** Влияние рециркуляции дымовых газов на работу и экологические показатели котла [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, В.А. Верещетин, К.Г. Берсенев // Электрические станции. – 2015. – № 7. – С. 27–31.

4. **Росляков, П.В.** Численные исследования малоэмиссионных горелочных устройств для сжигания ретортного газа в энергетическом котле [Текст] / П.В. Росляков, И.В. Морозов, М.Н. Зайченко, В.Т. Сидоркин // Теплоэнергетика. – 2016. – № 4. – С. 40–49.

5. **Тугов, А.Н.** Разработка мероприятий по усовершенствованию технологий энергетической утилизации газообразных отходов сланцепереработки [Текст] / А.Н. Тугов, А. Отс, В.Т. Сидоркин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2016. – № 6. – С. 53–62.

Патенты:

6. Пат. на пол. модель RU 159987 U1 F23C 9/00; F23B 80/02; F23L 7/00. Котельная установка для сжигания сланца и/или газообразных отходов его переработки [Текст] / Рябов Г.А., Тугов А.Н., Сидоркин В.Т.; патентообладатель ОАО «ВТИ». – № 2014153691/06; заявл. 29.12.2014, опубл. 27.02.2016, Бюл. № 6.

7. Пат. на пол. модель EE 01212 U1, кл. F23C 9/00; F23K 3/02; F23D 1/00. Meetod põlevkivi tolmpõletamiseks aurukatlas (на эстонском яз.) [Text] / Сидоркин В.Т., Тугов А.Н., Росляков П.В.; патентообладатель - ENTEH Engineering AS. – № U201300037; заявл. 15.04.2013; опубл. 15.01.2014.

8. Пат. на пол. модель EE 01341 U1, кл. F23C 10/00. Method of co-firing of solid and gaseous fuels in a boiler with circulating fluidized bed [Text] / Сидоркин В.Т., Тугов А.Н., Берсенев К.Г., Рябов Г.А.; патентообладатель - ENTEH Engineering AS. – № U201500070; заявл. 02.10.2015; опубл. 15.01.2016.

Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в научных изданиях:

9. Мельников, Д.А. Расчетная модель котла ТП-101 в программе Boiler Designe [Текст] / Д.А. Мельников, В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, В.Т. Сидоркин // Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования: труды Междунар. научно-практ. конф. «Boiler Designer-2014», Москва, 27–29 мая 2014. – М.: Торус Пресс, 2014. – С. 114–122.

10. Сидоркин, В.Т. Энергетическая утилизация побочных газообразных продуктов сланцепереработки [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: сборник материалов X Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября 2015 г. – М.: ФГУП «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2014. – С. 78–80.

11. Сидоркин, В.Т. Опыт совместного сжигания эстонского сланца с продуктами сланцепереработки в котлах БКЗ-75-39 ФСЛ и ТП-101 [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, А.К. Берсенев // Использование твердых топлив для

эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: сборник докладов II Международной научно-технической конференции, Москва, 28–29 октября 2014 г. – М.: ОАО «ВТИ», 2014. – С. 372–380.

12. **Верещетин, В.А.** Разработка и внедрение малотоксичных горелочных устройств для сжигания стандартных и нестандартных видов жидких и газообразных топлив [Текст] / В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, Ю.М. Усман, В.Т. Сидоркин // Химическая техника. – 2015. – № 7. – С. 29–32.

13. **Верещетин, В.А.** Современные малотоксичные горелочные устройства для сжигания жидких и газообразных топлив [Текст] / В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, В.Т. Сидоркин // Реконструкция энергетики – 2015: сборник докладов VII Всероссийской конференции, Москва, 9–10 июня 2015 г. – М.: ОАО «ИНТЕХЭКО», 2015. – С. 19–22.

14. **Melnikov, D.A.** Investigation of Heat Transfer in TP-101 Boiler While Co-Firing of Oil Shale and Oil Shale Gaseous By-Products [Text] / D.A. Melnikov, V.A. Vereschetin, A.N. Tugov, V.T. Sidorkin // Advance in Heat Transfer: proc. of the 7-th Baltic Heat Transfer Conf., August 24–26, 2015, Estonia, Tallinn: Tallinn University of Technology, 2015. – P. 253–256.

15. **Верещетин, В.А.** Утилизация газообразных отходов в существующих котлах / В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, В.Т. Сидоркин [Текст] // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Москва, 29 октября 2015 г. – М.: ФГУП «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2015. – С. 19–22.

16. **Сидоркин, В.Т.** Мероприятия по снижению коррозии трубчатых воздухоподогревателей паровых котлов при их переводе на сжигание высокосернистых топлив [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, К.Г. Берсенев // Международная конференция «IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике», Казань, 21–24 октября 2015 г.: сб. докладов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – Т. 3. – С. 132–140.

17. **Сидоркин, В.Т.** Опыт совместного сжигания сланца и газообразных продуктов его переработки на ТЭС Эстонии [Текст] / В.Т. Сидоркин, А.Н. Тугов, К.Г. Берсенев // IX Всерос. конф. с междунар. участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г.: сборник докладов. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. – С. 123.

18. **Сидоркин, В.Т.** Результаты работ по снижению выбросов NO_x при сжигании сланца и продуктов его переработки на Эстонской электростанции [Текст] / В.Т. Сидоркин, К.Г. Берсенев, А.Н. Тугов, А.Н. Мошников // Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла: сборник докладов III Международной научно-технической конференции, Москва, 28–29 июня 2016 г. – М.: ОАО «ВТИ», 2016. – С. 142–148.



ВТИ
ВСЕРОССИЙСКИЙ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
И Н С Т И Т У Т

ПМБ ВТИ. 115280, РФ, г. Москва, Автозаводская ул., д. 14.
Тираж 100 экз. Заказ № 47.
