

## ОТЗЫВ

официального оппонента Зройчикова Николая Алексеевича  
на диссертацию Сидоркина Владимира Тимофеевича  
**"Повышение эффективности сжигания побочных газообразных  
продуктов сланцепереработки в котлах ТЭС",**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их  
энергетические системы и агрегаты

**Актуальность темы** диссертации определяется следующими факторами. Горючие сланцы по разведанным запасам в пересчете на сланцевое масло сравнимы с нефтью. Однако их прямое сжигание в энергетических котлах приводит к интенсивному загрязнению золовыми отложениями топочных экранов и пароперегревателей, а также коррозионному и абразивному износу пароперегревателей и водяных экономайзеров. Трудность решения проблемы загрязнения поверхностей нагрева котлов обусловлены неблагоприятным сочетанием большого количества компонентов в минеральной части горючих сланцев, разнообразием и сложностью процессов их преобразования при сгорании, взаимодействием минеральных составляющих между собой и с металлом труб.

Поэтому более перспективным направлением использования горючих сланцев стала его термическая переработка с получением в качестве основного продукта сланцевого масла, применяемого в качестве энергетического топлива и сырья для производства ценных химических продуктов. Другой продукт термической переработки горючих сланцев – газ обычно сжигается в энергетических котлах, в котлах-утилизаторах, входящих в состав технологической схемы термической переработки горючих сланцев, или подается в качестве топлива для пиролиза горючих сланцев. В диссертации рассматривается только первый способ использования газов сланцепереработки – полукоксового и генераторного.

В диссертации объясняется, что энергетическое применение газов сланцепереработки в типовых котлах имеет много проблем и нерешенных задач в области экологии, надежности работы горелок и поверхностей нагрева. Доля газов сланцепереработки при их сжигании вместе со сланцами ограничена из-за шлакования поверхностей нагрева, а также отклонения параметров пара от нормативных величин вследствие изменения теплообмена в котле. Решение перечисленных проблем, а также создание оптимального типа горелок и условий их эксплуатации при сжигании полукоксового и генераторного газов свидетельствуют об актуальности диссертационной работы.

Актуальность темы подтверждается поддержкой, оказанной работе Министерством образования и науки РФ (проект REMEF158814X0006).

**Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты":**

– **в части формулы специальности:** "... проблемы совершенствования действующий и обоснования новых технологий ... систем подготовки и сжигания топлива, ... очистки дымовых газов ... В рамках специальности проводятся работы по совершенствованию действующих и обоснованию новых типов и конструкции ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций. Ведется поиск приемов и методов оптимизации рабочих режимов оборудования, ... выполняются ... экологические исследования";

– **в части области исследования:** "1. Разработка ... методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом.

3. Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий ... использования топлива ... , способов снижения влияния работы тепловых электростанций на окружающую среду.

4. Разработка конструкций ... вспомогательного оборудования ... , их проектирования..."

#### **Научная новизна рецензируемой работы:**

1. Определены важные характеристики горючих газов, необходимые для теплотехнических расчетов: компонентные составы, низшая теплота сгорания, расходы воздуха и продуктов сгорания, топливная характеристика горючих газов, адиабатическая температура горения.

2. Выполнен расчетный анализ параметров, важных для конструирования горелок – нормальной скорости распространения пламени, пределов взрываемости в воздухе, чисел Воббе.

3. Предложено преобразование азотной формулы для расчета коэффициента избытка воздуха с использованием основного уравнения горения и безразмерной топливной характеристики, в том числе и для топлив с большим содержанием азота

4. Показано существенное влияние азота топлива на расчет коэффициента избытка воздуха.

5. Получена совокупность технических, технологических и методических решений по эффективному сжиганию генераторного и полукоксового газов, в том числе обеспечивающих низкие выбросы  $\text{NO}_x$ .

#### **Практическая значимость рецензируемой работы:**

1. Разработаны мероприятия по реконструкции существующих и созданию новых котлов для эффективного сжигания газов сланцепереработки (полукоксового и генераторного) с обеспечением минимальных выбросов вредных веществ.

2. Разработаны и испытаны на действующих котлах различные типы горелочных устройств, предназначенные для сжигания газов сланцепереработки. Определены конструкции горелок, соответствующие специфическим особенностям полукоксового и генераторного газов. Предложены конструкции, пригодные для отдельного и совместного

сжигания рассматриваемых газов в условиях колебаний их состава и теплоты сгорания.

**Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и производства:**

1. Предложены основные 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 различной модификации).

2. Предложены внутритопочные (первичные) мероприятия, позволяющие за счет рециркуляции дымовых газов в горелки совместно со стадийной подачей окислителя и топлива в 4-6 раз снизить концентрацию оксидов азота (до нормативных значений  $\text{NO}_x = 100 \text{ мг/нм}^3$ ).

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций,** сформулированных в диссертации, подтверждается удовлетворительным согласованием экспериментальных данных с литературными и с результатами численного моделирования; согласованием показаний приборов экспериментального контроля со штатными приборами на котле; использованием поверенной современной измерительной аппаратуры; применением апробированных программных пакетов Boiler Designer и Ansys CFX и использованием наиболее проверенных для решаемых задач математических моделей.

Результаты работы внедрены на следующих объектах: 1) на четырех котлах БКЗ-75-39ФСл Северной электростанции в г. Кохтла-Ярве, 2) на котле ТП-101 Эстонской ЭС, 3) на котлах Е-25 и ТС-35 теплоэлектростанции в г. Кивиыли, 4) использованы при проектировании и изготовлении шести

двухтопливных горелок для котла E-135-3,2-420ДГ, поставленного котельным заводом "Белэнергомаш-БЗЭМ" фирме VKG ENERGIA OÜ.

**Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

1. Принципы проектирования горелок для сжигания полукоксового и генераторного газов могут быть применены для горелок, предназначенных для сжигания природного, коксового и доменного газов.

2. Разработанные в диссертации методы снижения концентрации оксидов азота в газах, уходящих из котельных установок, могут быть применены при сжигании природного, коксового и доменного газов.

**Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертация изложена на 126 стр., включая 31 рисунок и 5 таблиц. Общий объем диссертации 151 стр., в том числе список литературы (112 источников) и приложения. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и трех приложений.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту; обоснована достоверность результатов работы, отмечен личный вклад автора в диссертацию, дана информация о внедрении, апробации работы и публикациях по теме диссертации.

**В первой главе** приводится информация о современных технологиях переработки сланцев. Наибольшее внимание уделяется процессу "Галотер", созданному специалистами ЭНИН им. Г.М.Кржижановского при участии Института химии Академии наук Эстонии для переработки мелкозернистого сланца, и процессу "Кивитер" для переработки крупнокускового сланца. Основным продуктом переработки горючих сланцев в обоих процессах – сланцевое масло, применяемое в качестве жидкого котельного топлива и сырья для производства ценных химических продуктов.

Другим продуктом сланцепереработки является газ – высококалорийный полукоксовый в процессе "Галотер" и низкокалорийный генераторный в процессе "Кивитер". Основное внимание в этой главе уделяется опыту использования этих газов в энергетических котлах и возникающих при этом проблемах. В конце главы изложены направления исследований для решения проблем создания эффективных и экологически допустимых технологий сжигания газов сланцепереработки.

**Во второй главе** определены основные характеристики полукоксового и генераторного газов, необходимые для проектирования горелочных устройств, расчетов процессов горения и теплообмена в топке: компонентные составы, теплота сгорания, расходы воздуха на горение, удельные объемы продуктов сгорания, адиабатические температуры горения, нормальные скорости распространения пламени, нижний и верхний пределы взрываемости газов в воздухе.

Выполнены экспериментальные и расчетные оценки температуры точки росы дымовых газов, необходимые для разработки мероприятий по предотвращению сернокислотной коррозии воздухоподогревателей.

**В третьей главе** анализируются результаты испытаний на котлах различных типов горелочных устройств, разработанных для сжигания полукоксового и генераторного газов. Определены оптимальные типы горелок. Предложены конструкции горелок для отдельного и совместного сжигания указанных газов при колебаниях их состава и теплоты сгорания.

Предложено вести контроль режима работы горелок по концентрации кислорода в смеси дутьевого воздуха и газов рециркуляции с целью обеспечения оптимального процесса горения при изменении содержания кислорода в дымовых газах рециркуляции.

Доказана целесообразность преобразования азотной формулы для расчетов коэффициента избытка воздуха.

**В четвертой главе** предложены мероприятия по повышению надежности работы конвективных поверхностей нагрева котлов при

сжигании газов сланцепереработки и для предотвращения шлакования и загрязнения топочных экранов и пароперегревателей при совместном сжигании сланца с полукоксовым и генераторным газами.

Для предотвращения низкотемпературной коррозии холодного пакета трубчатого воздухоподогревателя с целью поддержания 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 режимных факторов, влияющих на конструкцию трубчатого воздухоподогревателя с позиции надежности и экономичности, представлены три модификации подачи воздуха в воздухоподогреватель, реализованные на реконструированных котлах БКЗ-75-39 Северной ЭС.

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 воздухоподогревателем.

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 увеличивает 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. Это 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 паропроизводительностью 320 т/ч с установкой шести горелок для сжигания полукоксового газа суммарной мощностью 40% от 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  $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_x$  при сжигании полукоксового и генераторного газов.

В горелках для сжигания полукоксового газа применены 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 комбинации 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 четырех реконструированных котлах БКЗ-75-39Ф показало, что можно добиться снижения содержания  $\text{NO}_x$  в дымовых газах до 145-300 мг/нм<sup>3</sup>.

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. 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  $\text{NO}_x$  в газовых горелках.

Проведенные исследования и результаты, полученные на котле ТП-101, показывают, что при сжигании полукоксового газа с избытками воздуха в разработанных горелках до 0,70-0,80 и пониженном за счет рециркуляции до 15,5-17,5% содержании кислорода в дутьевом воздухе могут быть обеспечены самые жесткие нормативные требования по концентрациям  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания – вплоть до 100 мг/нм<sup>3</sup>.

Для снижения выбросов оксидов серы исследовалась технология подачи сорбента в топку котла. Результаты стендовых исследований 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 не уменьшается реакционная поверхность сорбента. 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 счет этого метода невозможно по причине ограниченной эффективности метода. Метод может применяться на котлах при сжигании газов с низким исходным содержанием серы и с достаточно мягкими требованиями к выбросам диоксида серы (до 400-800 мг/нм<sup>3</sup>), а также в комбинации с установками десульфуризации. В последнем случае в топке происходит декарбонизация известняка и частичное связывание диоксида серы, а основное его связывание осуществляется в установке десульфуризации с использованием в качестве реагента отожженной в топке извести.

В разделе **"Выводы по диссертации"** обобщены полученные в процессе исследований данные, сформулированы основные научные результаты работы, указана их практическая ценность.

#### **Замечания по диссертации**

стр. 11. Правильнее употреблять термин пропускная способность по сланцу, а не производительность, так как установка перерабатывает, а не производит сланец.

стр. 15. В Таллинне на заводе "Ильмарине" была создана установка пропускной способностью по сланцу 100 кг в час, т.е. 2,4 тонны в сутки – УТТ-2,4, а не УТТ-1,4.

стр. 15. Установка УТТ-200 работала с 1953 по 1962 гг., а не с 1956 по 1963 гг., УТТ-500 – с 1963 по 1981 гг., а не с 1954 по 1960 годы.

стр. 17. Отсутствует информация о достигнутых параметрах установки ENEFIT-280 после окончания ее строительства в 2012 г.

стр. 17. Процесс "ПЕТРОСИКС", созданный бразильской корпорацией "ПЕТРОБРАЗ", гораздо эффективнее процесса "КИВИТЕР" по следующим параметрам:

- пропускная способность "ПЕТРОСИКС" 6200 тонн сланца в сутки;
- теплота сгорания газа в "ПЕТРОСИКС" до 44 МДж/м<sup>3</sup> благодаря

внешнему нагреву парогазовой смеси пиролизным газом сланца. Поэтому в

газовом теплоносителе нет азота из воздуха [2, том 4, стр. 90-95], [7, стр. 171].

стр. 24. Перспективы сжигания полукоксового газа и его масштабы напрямую связаны с обеспечением длительной и надежной эксплуатации установки ENEFIT-280, построенной в 2012 г., и решением в зависимости от этого вопроса о строительстве еще двух установок этого типа.

стр. 36. Цифры, приведенные на стр. 36, не совпадают с данными таблицы 2.1.

стр. 44. В таблице 2.1 нет величин нижнего и верхнего пределов взрывоопасности ни для генераторного, ни для полукоксового газов. В таблице 2.1 есть данные нижнего и верхнего пределов воспламенения. Эта путаница терминов содержится и на стр. 45, где используются оба термина.

стр. 48. Точнее не сернистая, а серноокислотная коррозия.

стр. 50. Прибор Lancom 200 был проверен в диапазоне температур точки росы 46-56°C, а замеры выполнялись в диапазоне 120-140°C.

стр. 51. Нет объяснения параметров, входящих в формулы (2.9), (2.10), (2.11).

стр. 59, табл. 3.1. Вместо "примечания" следовало написать "общий вид горелок".

стр. 63, табл. 3.2. См. замечание к табл. 3.1.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация легко читается, количество ошибок (в основном пунктуационных) незначительно. Автореферат соответствует тексту диссертации. Публикации в открытой печати раскрывают сущность работы, количество публикаций по списку ВАК достаточно для кандидатской диссертации.

## Заключение по работе

Диссертация В.Т. Сидоркина является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения, позволяющие эффективно сжигать в котлах ТЭС газы, получаемые при термической переработке горючих сланцев, в качестве основного топлива и вместе со сланцами с достижением нормативных величин выбросов оксидов азота и диоксидов серы.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Сидоркин Владимир Тимофеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 "Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты".

### Официальный оппонент

Заведующий отделением технологий использования топлив  
и экологии энергетики ОАО "ЭНИН"  
доктор технических наук, профессор

Зройчиков Николай Алексеевич

119991, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 19  
Тел.: +7(495)770-31-09  
e-mail: [zna@eninnet.ru](mailto:zna@eninnet.ru)

Подпись Н.А.Зройчикова заверяю:

/Заведующий отделом управления персоналом  
ОАО "ЭНИН", к.э.н.



В.К.Савченко