

На правах рукописи



ЯНОВ Сергей Романович

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ТЕПЛОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ
ПАРОВЫХ КОТЛОВ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика
05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Бойко Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Журавлев Валентин Михайлович

кандидат технических наук
Пронин Михаил Степанович

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Всероссий-
ский дважды ордена Трудового Красного Знаме-
ни Теплотехнический научно-исследовательский
институт» (г. Москва)

Защита состоится «28» апреля 2010 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертаци-
онного совета ДМ 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального уни-
верситета, по адресу г. Красноярск, ул. Киренского, 26 ауд. Г-274.

Автореферат разослан «24» марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Т. М. Чупак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вопросы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева паровых котлов сохраняют свою актуальность, несмотря на многочисленные исследования, а также большой опыт проектирования и эксплуатации котельного оборудования при сжигании различных углей. Интерес к проблеме образования отложений в газовом тракте котлов обусловлен наряду с наличием традиционных причин, также необходимостью постановки и решения новых задач. Традиционные проблемы характеризуются большим экономическим ущербом, связанным с образованием отложений из-за несовершенства конструкций котлов, методов их расчета и контроля. К числу новых задач относятся: освоение новых и нетрадиционных технологий сжигания топлива; улучшение экологических показателей путем изменения качества топлива, применением добавок и угольных смесей; сжигание непроектных углей, необходимость управления системами комплексной очистки поверхностей нагрева.

Статистический анализ видов и причин отказов паровых котлов при сжигании твердых органических топлив показывает, что одной из основных причин аварийных остановов котельных агрегатов является низкая надежность работы полурадационных и конвективных поверхностей нагрева, вследствие интенсивного их шлакования и загрязнения. В первую очередь это вызвано особенностями компоновки и жесткими температурными условиями работы поверхностей нагрева. В связи с этим существенно возрастает роль научно-обоснованного подхода при выполнении проектных расчетов, наладке и технической диагностике эксплуатационных режимов полурадационных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов.

Одним из определяющих факторов эффективного проектирования современных энергетических котельных агрегатов является нахождение рациональных конструктивных характеристик и компоновочных решений поверхностей нагрева, обеспечивающих высокий уровень их тепловой эффективности при работе средств очистки и надежности эксплуатации. Выбор таких решений зависит во многом от вида сжигаемого топлива, характера теплообмена, ряда конструктивных и режимных параметров.

В настоящее время для оценки тепловосприятости поверхностей нагрева котельных агрегатов при решении проектных задач используется коэффициент тепловой эффективности (ψ), обобщенный по результатам стендовых и промышленных тепловых испытаний котельных агрегатов, рекомендации по выбору которого представлены в «Нормах теплового расчета паровых котлов» (НТР). Однако, как показывает опыт эксплуатации, значения коэффициентов тепловой эффективности, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений, что как следствие приводит к повышению проектных рисков и ограничению номинальной паропроизводительности котла вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева. В этой связи работа по исследованию и определению тепловой эффективности полурадационных и конвективных поверхностей нагрева при различных конструктивных и режимных параметрах работы паровых котлов при

сжигании твердых органических топлив является особенно актуальной.

Объект исследования – полурadiaционные и конвективные поверхности нагрева пылеугольных котельных агрегатов П-67 Березовской ГРЭС, П-57 и ПК-39 Рефтинской ГРЭС, ПК-38 Назаровской ГРЭС, БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2, БКЗ-220-100ф Улан-Удэнской ТЭЦ-1 и Читинской ТЭЦ-1, ТП-87м Кемеровской ГРЭС.

Предметом исследования являются характеристики тепловой эффективности поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов.

Цель работы – разработка проектных, прогнозных и управленческих решений для обеспечения тепловой эффективности и эксплуатационной надежности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных котлов.

Задачи исследования:

1. Анализ причин повреждаемости поверхностей нагрева пылеугольных котлов в процессе их эксплуатации, а также влияния процессов шлакования и загрязнения теплообменных поверхностей нагрева котельного агрегата на экономичность и надежность их работы. Анализ существующих методов диагностики поверхностей нагрева котельного агрегата.

2. Совершенствование методики, алгоритмического и программного обеспечения для оценки уровня шлакования и загрязнения поверхностей нагрева паровых котлов.

3. Проведение экспериментально-расчетных исследований по влиянию химического состава минеральной части топлива и конструктивно-режимных параметров работы поверхностей нагрева паровых котлов на интенсивность их шлакования и загрязнения.

4. Разработка проектных, прогнозных и управленческих решений по обеспечению и повышению тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов.

Научная новизна работы:

1. Усовершенствованы методика и алгоритм определения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в режиме реального времени в части оценки коэффициентов теплопередачи чистой и загрязненной поверхности теплообмена, учитывающие конструктивные и режимные особенности, как отдельной поверхности, так и котла в целом, что обеспечивает адекватную оценку показателей тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов.

2. Получены многофакторные экспериментальные зависимости интенсивности шлакования и загрязнения полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов от химического состава минеральной части сжигаемых топлив, температуры газов и рабочей среды, паропроизводительности котла и конструктивных параметров исполнения поверхности нагрева, что позволяет повысить точность и достоверность поверочно-конструкторских расчетов котельных агрегатов.

3. Разработаны методика прогноза процесса шлакования и алгоритм применения средств очистки полурadiaционных и конвективных поверхностей

нагрева от наружных отложений в режиме реального времени при различных режимах работы котла, основанные на анализе данных оперативного контроля показателей тепловой эффективности до и после использования обдувочных аппаратов, что позволяет повысить надежность и экономичность эксплуатации котла, а также эффективность применяемых средств очистки.

Практическая значимость работы:

1. Разработано и внедрено в практику (котельный агрегат П-67 Березовской ГРЭС-1) алгоритмическое и программное обеспечение для оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлов в режиме реального времени, что позволяет снизить затраты на проведение котлоочистных мероприятий, повысить экономичность и надежность работы оборудования.

2. Создан банк данных значений коэффициентов тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева при сжигании широкого класса углей на котлах разных типов, практическое использование которого позволяет повысить точность определения площади поверхности нагрева с обеспечением необходимого регулировочного диапазона при создании новых, а также модернизации, реконструкции и наладке действующих паровых котлов.

3. Усовершенствована система технической диагностики процессов шлакования и загрязнения полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева в режиме реального времени, позволяющая определить уровень загрязнения, как отдельной поверхности нагрева с учетом их индивидуальной компоновки, так и котла в целом, а также обеспечить оптимальный режим их очистки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика и алгоритм оперативного определения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева паровых котлов.

2. Экспериментально-расчетные зависимости для оценки коэффициентов тепловой эффективности поверхностей нагрева от конструктивных и эксплуатационных параметров работы котла при стационарных и нестационарных режимах, в том числе при работе средств очистки.

3. Система технической диагностики процессов загрязнения и шлакования поверхностей нагрева в режиме реального времени и управления обдувочными аппаратами.

4. Алгоритм оперативного контроля и прогнозирования тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов и оптимизации работы средств их очистки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных вычислительных программных сред, используемых при обработке результатов испытаний; применением высокоточных средств измерения при проведении натуральных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов, полученных другими авторами, и данными натуральных экспериментов, полученных на действующем энергетическом оборудовании.

Личный вклад автора состоит в совершенствовании алгоритмического и программного обеспечения для оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлов; в организации и проведении балансовых испытаний котлов П-67 (ст. №№1, 2) Березовской ГРЭС, П-57 (ст. №9) и ПК-39 (ст. №6) Реф-

тинской ГРЭС, ПК-38 (ст. №№1-6) Назаровской ГРЭС и др., проведении вычислительных и натуральных экспериментов, формулировании основных выводов.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на: Всероссийской конференции по итогам конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России» (Краснодарский край, с. Дивноморск, 2005 г.); IV международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири» (г. Красноярск, 2005 г.); Всероссийской конференции по итогам Конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России» (Тульская область, с. Поленово, 2006 г.); конкурсе инновационных проектов студентов и аспирантов по направлению «Энергетика и энергосбережение» (Томск, 2006 г.); IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов» (г. Челябинск, 2007 г.); IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность и жизнеобеспечение города» (Красноярск, 2008 г.); 4-ой международной научно-практической конференции «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития» (Крым, Алушта, 2008 г.); III-ем Всероссийском конкурсе молодых специалистов инжинирингового профиля в области электроэнергетики (Краснодарский край, с. Дивноморск, 2009 г.), международной научно-технической конференции «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля» (г. Москва, 2009 г.); VII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2009 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, из которых: 1 – статья из перечня ВАК, 1 – свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ, 11 – доклады на конференциях и статьи в межвузовских сборниках научных трудов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, научных выводов и рекомендаций, списка литературы из 108 наименований и содержит 144 страниц текста, включая 103 рисунка и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность работы.

В первом разделе показана значимость твердого органического топлива для энергетического баланса России, особенно для восточных ее районов. Рассмотрены проблемы, связанные с использованием шлакующих углей на тепловых электростанциях.

Особое внимание исследованию процессов шлакования и загрязнения уделялось в период опытных сжиганий углей Канско-Ачинского бассейна. Для изучения этих процессов были привлечены такие научно-исследовательские институты как ОАО «ВТИ» (Н.В. Кузнецов, Э.П. Дик, М.Н. Майданик и др.), УралВТИ (А.Н. Алехнович, В.В. Богомоллов и др.), НПО ЦКТИ (В.С. Назаренко и др.) и СибВТИ (М.Я. Процайло, В.В. Васильев, М.С. Пронин и др.). В настоящее время существует несколько подходов к решению задачи снижения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей

нагрева котлов, которые можно классифицировать на активные и пассивные. Суть активных методов заключается в совершенствовании топочно-горелочных устройств, а также компоновки и конструктивного исполнения различных поверхностей нагрева котельных агрегатов. В свою очередь, пассивные методы направлены на использование в пылеугольных котлах средств очистки с комплексными системами технической диагностики. Как показала практика создания, внедрения и эксплуатации методов и средств по обеспечению тепловой эффективности поверхностей нагрева паровых котлов исходя из соотношения качества получаемого результата и стоимости реализации наиболее предпочтительным считается комплексный подход, при котором зоны эффективной очистки поверхностей нагрева рассчитываются при проектировании котла с определением минимально допустимых поперечного и продольного шага труб конвективных поверхностей нагрева. Данные системы получили широкое применение не только за рубежом, но и успешно эксплуатируются на отечественных электростанциях. Например, система диагностики шлакования и автоматического управления обдувочными аппаратами «FACOS» немецкой фирмы «Clyde-Bergemann GmbH» установлена на таких котлах как П-67 (ст. №1) Березовской ГРЭС и ПК-39 (ст. №6Б) Рефтинской ГРЭС. Применение системы «FACOS» на котле П-67 (ст. №1) позволило повысить КПД на 1 % и повысить бесшлаковочную мощность более, чем на 50 МВт. Тем не менее, как показывает практика эксплуатации, в таких системах не учитывается ряд факторов, которые в свою очередь могут повлиять на эффективность их работы и котельного агрегата в целом. При этом высокая стоимость зарубежных систем диагностики приводит к необходимости создания отечественных систем работающих в режиме реального времени, которые бы учитывали конструктивные особенности как отдельной поверхности нагрева, так и их совокупности, эксплуатационные факторы и особенности работы вспомогательного оборудования.

При проектировании котельных агрегатов в качестве критерия шлакования и загрязнения поверхностей нагрева традиционно используют коэффициент тепловой эффективности (ψ) и загрязнения (ε). Значения указанных показателей рекомендованы в «Нормах теплового расчета паровых котлов» (НТР), а выбор их численных значений определяется в зависимости от типа конструкции поверхности нагрева и вида сжигаемого топлива. В основу данных рекомендаций положены результаты экспериментальных исследований коллективов авторов, представляющие такие организации как ОАО «ВТИ» (г. Москва) и НПО ЦКТИ (г. Санкт-Петербург). Однако, как показывает опыт эксплуатации, значения коэффициентов тепловой эффективности и загрязнения, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений, что, как следствие, приводит к повышению проектных рисков (подтверждение гарантийных показателей) и ограничению номинальной паропроизводительности котла вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева допустимых значений. Следует отметить, что в нормативных материалах представлена зависимость изменения коэффициентов тепловой эффективности и загрязнения от температуры газов для различных твердых органических топлив, при этом классификация топлив представлена недостаточно корректно. Так же не показано влияние средств очистки на изменение нормативных коэффициентов поверхностей нагрева. Кроме того, проектные значения коэффициентов представлены только для номинальной паропроизводительности и отсутствуют объективные рекомендации для их выбора

при пониженных нагрузках котла. Однако, эти зависимости крайне необходимы, так как при проектировании котельных агрегатов теплогидравлические расчеты производятся на весь диапазон режимов их работы. Указанные выше недостатки существующего подхода могут повлиять на надежность и экономичность работы паровых котлов на всех диапазонах нагрузок. В связи с этим для повышения надежности эксплуатации паровых котлов необходимо выявить и обосновать факторы, влияющие на показатели тепловой эффективности при сжигании различных топлив в зависимости от типа и конструктивных характеристик поверхностей нагрева котельных агрегатов.

В качестве объектов исследований использовались паровые котлы: П-67 Березовской ГРЭС, ПК-38 Назаровской ГРЭС, ПК-39 и П-57 Рефтинской ГРЭС и т.д. В разделе представлена краткая характеристика перечисленных котельных агрегатов, выбор которых объясняется: наличием большого количества развитых полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева; использованием на котлах современных АСУ ТП, что позволяет определять изменение показателей тепловой эффективности в режиме реального времени; применением современных средств очистки от наружных отложений поверхностей нагрева, что дает возможность проводить независимую оценку эффективности проведения очистки каждой поверхности нагрева котла.

В заключении сформулированы основные задачи исследований, проводимых в диссертационной работе.

Во втором разделе описана усовершенствованная методика исследования показателей тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева для различных котлов, сжигающих твердое органическое топливо.

В качестве базового показателя эффективности теплообмена выбран коэффициент тепловой эффективности – ψ в силу нормируемости и безразмерности данного параметра.

Оценка коэффициента тепловой эффективности произвольной поверхности нагрева осуществляется по соотношению:

$$\psi = \frac{K_{\text{факт}}}{K}, \quad (1)$$

где $K_{\text{факт}}$ – фактический коэффициент теплопередачи реальной поверхности нагрева, кВт/(м²·°С); K – коэффициент теплопередачи для чистой поверхности (без учета коэффициента загрязнения), кВт/(м²·°С).

Фактический коэффициент теплопередачи в свою очередь для произвольно взятой поверхности нагрева определяется по уравнению:

$$K_{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{факт}} B_p}{F \Delta t}, \quad (2)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м²; Δt – среднелогарифмический температурный напор, °С; $Q_{\text{факт}}$ – фактическое тепловосприятие поверхности нагрева, кДж/кг; B_p – расчетный расход топлива, кг/с.

Для нахождения величины фактического тепловосприятия поверхности нагрева используется уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{факт}} = \phi(H' - H'') - Q_{\text{доп}} = \frac{D_{\text{пе}}}{B_p} (h'' - h') - Q_{\text{л}}, \quad (3)$$

где H' , H'' – энтальпии газов до и после поверхности нагрева, кДж/кг; $D_{не}$ – расход рабочей среды, кг/с; h' , h'' – энтальпии рабочей среды до и после поверхности нагрева, кДж/кг; $Q_{доп}$ – тепловосприятие дополнительных (прилегающих) поверхностей; $Q_{и}$ – тепловосприятие поверхности нагрева излучением; ϕ – коэффициент сохранения тепла.

Определение значений температурного напора (Δt , °C) и фактического тепловосприятия поверхности нагрева ($Q_{факт}$, кДж/кг) осуществляется путем решения системы нелинейных балансовых уравнений при известных температурах теплоносителей, участвующих в теплообмене, как на входе, так и на выходе из каждой анализируемой поверхности, измеряемых системой штатного контроля котла (рис. 1). Для примера на рисунке 1 представлена измерительная схема для оценки эффективности теплообмена поверхностей нагрева на примере котла ПК-38 Назаровской ГРЭС.

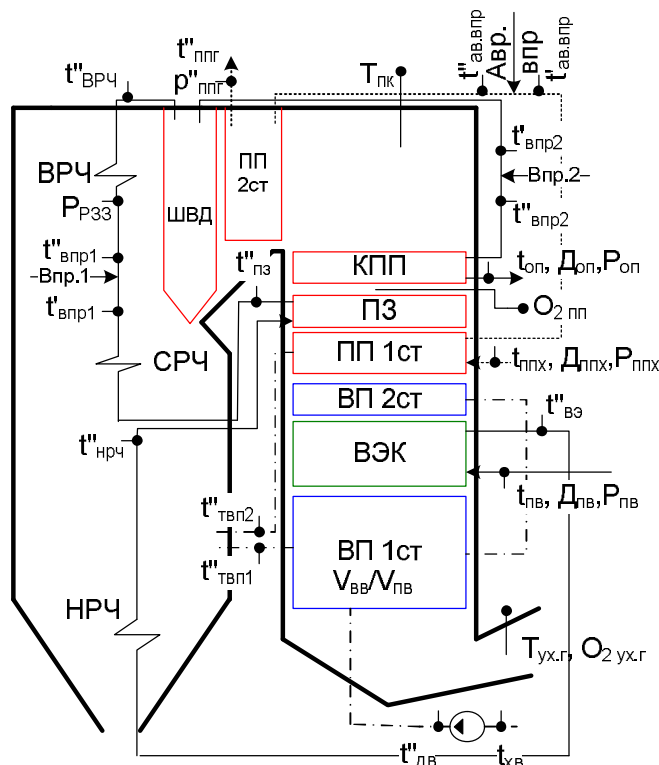


Рисунок 1 – Схема измерений для определения коэффициентов тепловой эффективности поверхностей нагрева для котла ПК-38 Назаровской ГРЭС

Особенностью методики и алгоритма оценки коэффициента теплопередачи для чистой поверхности нагрева (K , кВт/(м²·°C) является его нахождение с учетом реальных эксплуатационных параметров работы котла, определяемых в режиме реального времени и характеристик сжигаемого топлива.

В качестве исходных данных используются режимные характеристики штатного контроля котлов. Для определения дополнительных показателей, проведены балансовые испытания согласно общепринятым методикам испытаний котельных агрегатов РД 34.25.514-96, РД 153-34.1-26.303-98.

Результаты балансовых испытаний котла положены в основу исходных данных для работы алгоритма определения эффективности теплообмена каждой поверхности нагрева для различных котлов в режиме реального времени, при котором значения коэффициента теплопередачи для чистой поверхности нагрева определяются на идентичные режимные параметры, используемые при расчете фактического коэффициента теплопередачи.

На основе усовершенствованного алгоритма разработано программное обеспечение (ТЭФ), используемое в дальнейшем для проведения экспериментально-расчетных исследований и позволяющее оценить изменения коэффициента тепловой эффективности как поверхности в целом (рис. 2), так и отдельных

ее элементов (рис. 3) в зависимости от качества топлива, режимных параметров, очистки, состояния и состава вспомогательного оборудования парового котла.

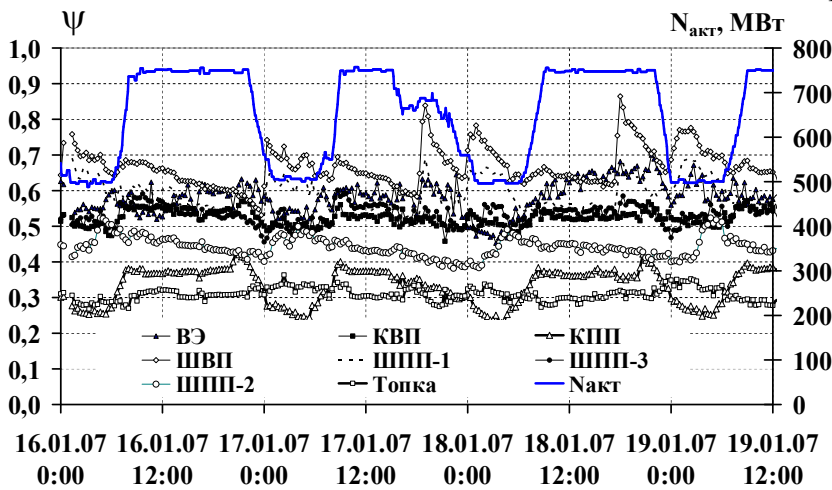


Рисунок 2 – Изменения коэффициентов тепловой эффективности полурадационных и конвективных поверхностей нагрева котла П-67 ст.№1 Березовской ГРЭС

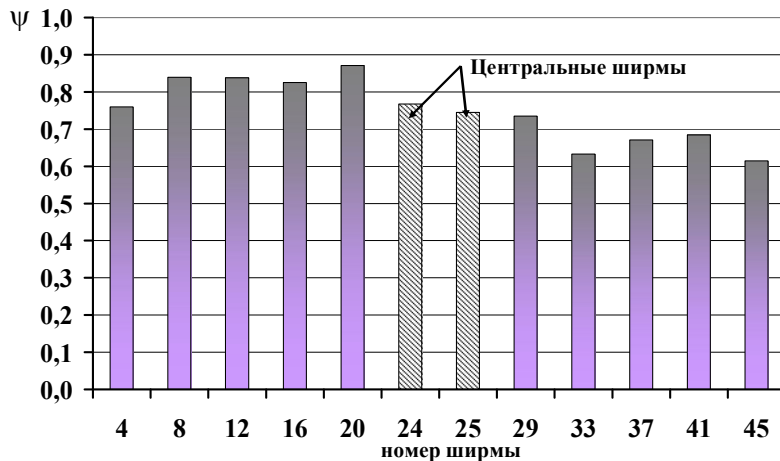


Рисунок 3 – Значение коэффициентов тепловой эффективности отдельных ширм вторичного пароперегревателя (ШВП) П-67 ст.№2 Березовской ГРЭС

ты котла.

По результатам тепловых испытаний получены экспериментальные зависимости коэффициента тепловой эффективности полурадационных и конвективных поверхностей нагрева от температуры газов для котлов, сжигающих сильно шлакующие и умерено шлакующие угли. Для построения экспериментальных зависимостей, аналогичных «нормативным», использовались значения коэффициентов тепловой эффективности, полученные только при номинальных нагрузках котлов. Обработка опытных данных осуществлялась с использованием многофакторного корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных данных. Полученные зависимости коэффициентов тепловой эффективности поверхностей нагрева различных пылеугольных паровых котлов от температуры газов в сопоставлении с «нормативными» представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что экспериментальные кривые имеют значительное отличие как друг от друга, так и от нормативных данных; при этом практически все они попадают под определение «сильно шлакующих» топлив. В области низких

В третьем разделе представлены результаты экспериментально-расчетного исследования тепловой эффективности полурадационных и конвективных поверхностей нагрева для различных пылеугольных паровых котлов в широком диапазоне изменения их паропроизводительности. Значения коэффициентов тепловой эффективности поверхностей нагрева определялись по результатам тепловых балансовых испытаний котлов в диапазоне нагрузок 50–100% от номинальной нагрузки. Во время балансовых опытов с помощью «ТЭФ» фиксировались изменения коэффициентов тепловой эффективности при различных режимах работы вспомогательного оборудования котла на стационарных и нестационарных нагрузках рабо-

температур газов (600–700 °С) отклонения в значениях коэффициентов тепловой эффективности от нормативных составляют 0,25–0,3, в области высоких температур (850–950 °С) – 0,45–0,5. Во многом, такой результат объясняется тем, что исследуемый процесс носит сугубо многофакторный и интегральный характер, а также тем, что классификация топлив на «сильно» и «умеренно шлакующие» только по содержанию в минеральной части угля оксидов кальция (СаО) является недостаточно корректной.

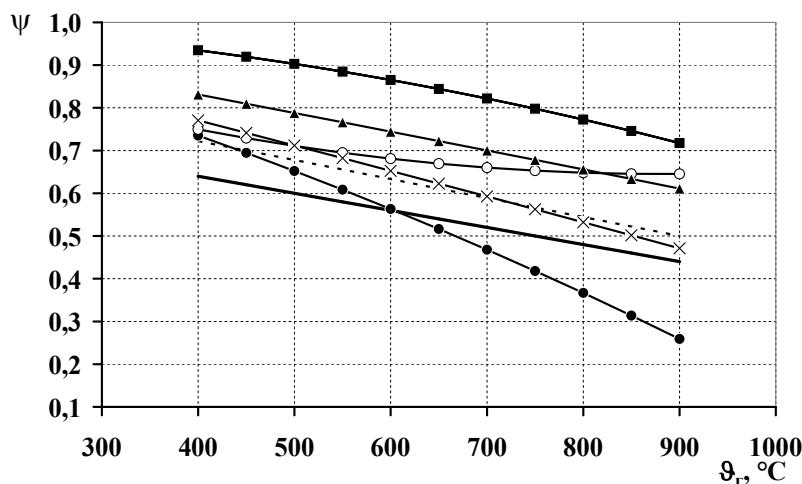


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости коэффициента тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева котлов сжигающих твердое топливо: «---» – нормативная кривая для умеренно загрязняющих и сильно загрязняющих с очисткой; «—» – нормативная кривая для сильно загрязняющих без очистки; —●— – котел П-67; —■— – котел П-57; —▲— – котел ПК-39; —○— – котел ПК-38; —х— – котел БКЗ-220-100Ф (У-УТЭЦ-1)

грузках. Получено, что при постоянной температуре газов, но при разной температуре пара значение ψ будет выше на той поверхности, где ниже температура рабочей среды. Установлено, что выявленная двухфакторная зависимость определяется типом поверхности нагрева и видом сжигаемых углей, которая с удовлетворительной точностью описывается уравнением множественной квадратичной регрессии:

$$\psi(\theta_r, t_{cp}) = a_0 + a_1\theta_r + a_2 \cdot t_{cp} + a_3\theta_r^2 + a_4t_{cp}^2 + a_5\theta_r t_{cp}, \quad (4)$$

где θ_r – температура продуктов сгорания, °С; t_{cp} – температура рабочей среды, °С; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – параметры модели. Параметры модели многофакторной зависимости для каждого типа поверхности представлены в таблице.

Анализ полученных зависимостей показывает, что для котла П-67 увеличение температуры среды на 50 °С при постоянной температуре газов приводит к снижению коэффициента тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева на 4,5–7 % (при $\theta_r = 440$ –820 °С, $t_{cp} = 250$ –530 °С), для полурадиационных на 3–5 % (при $\theta_r = 860$ –1190 °С, $t_{cp} = 390$ –500 °С); для котла П-57 влияние температуры пара в конвективных поверхностях нагрева не выявлено (при $\theta_r = 420$ –960 °С, $t_{cp} = 290$ –520 °С), а для полурадиационных увеличение температуры среды на

Известно, что температура рабочей среды (температура стенки) может оказывать влияние на интенсивность шлакования и загрязнения полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева паровых колосов. В этой связи на котлах П-67 и П-57 были проведены специальные экспериментальные исследования с целью выявления многофакторных зависимостей коэффициента тепловой эффективности от температуры газов и температуры рабочей среды при номинальных на-

10 °С приводит к уменьшению коэффициента тепловой эффективности на 5–6 % (при $\vartheta_r = 1040\text{--}1080$ °С, $t_{cp} = 450\text{--}500$ °С).

Таблица – Характеристика множественной регрессии, описывающей зависимость коэффициента тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева котлов П-57 и П-67 от температур газов и рабочей среды

Котел	Тип поверхности	Значения коэффициентов уравнения (4) квадратичной множественной регрессии						Коэффициент корреляции
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	
П-57	Полурадиационная	3,44	$-4,26 \cdot 10^{-4}$	$-2,64 \cdot 10^{-3}$	$-1,64 \cdot 10^{-6}$	$-3,21 \cdot 10^{-6}$	$2,89 \cdot 10^{-6}$	0,85
П-67	Полурадиационная	0,85	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$-4,47 \cdot 10^{-4}$	$-3,10 \cdot 10^{-7}$	$-2,03 \cdot 10^{-9}$	$1,43 \cdot 10^{-9}$	0,97
П-57	Конвективная	1	$-5,72 \cdot 10^{-5}$	0	$-2,90 \cdot 10^{-7}$	0	0	0,90
П-67	Конвективная	0,98	$-2,51 \cdot 10^{-4}$	$-4,24 \cdot 10^{-4}$	$-3,10 \cdot 10^{-7}$	$2,24 \cdot 10^{-9}$	$8,00 \cdot 10^{-10}$	0,97

Одной из существенных причин изменения тепловой эффективности поверхностей нагрева является использование различных средств их очистки. Как показывает опыт эксплуатации эффект от очистки может оказывать существенное влияние в зависимости от вида рабочей среды, типа, расположения и количества применяемых обдувочных аппаратов, а также конструктивных особенностей поверхности нагрева. Важной конструктивной характеристикой, определяющей интегральную величину ψ является количество рядов по ходу газов (z_2). Варьирование величины z_2 приводит к изменению эффективной площади очистки поверхности нагрева. Значительное отличие числа рядов z_2 между поверхностями в сочетании с применением средств очистки может привести к нарушению линейной зависимости ψ от температуры газов. Этот факт подтверждают результаты тепловых испытаний, проведенные на котле БКЗ-500-140 (ст. №6) Красноярской ТЭЦ-2, сжигающем бородинский уголь.

На данном котле установлено три конвективных ступени пароперегревателей, отличающихся принципиально друг от друга количеством рядов по ходу газов z_2 , оснащенных паровыми глубоководными обдувочными аппаратами, типа ОГ-8. По результатам испытаний значение ψ четвертой ступени пароперегревателя (ПП-4, $z_2 = 10$) изменялось в диапазоне 0,69–0,85 при средней температуре газов 890 °С, третьей ступени (ПП-3, $z_2 = 20$) в диапазоне 0,3–0,38, при средней температуре газов 825 °С, первой ступени (ПП-1, $z_2 = 24$) в диапазоне 0,543–0,625, при средней температуре газов 725 °С. На основе полученных результатов выявлен характер изменения тепловой эффективности ступеней конвективного пароперегревателя (рис. 5) от числа рядов по ходу газов z_2 и от температуры газов. Однако следует уточнить, что найденная зависимость может существенно измениться при условии применения на котле других средств очистки. В этой связи выполнено формирование и систематизация базы данных, с увязкой показателей тепловой эффективности поверхности нагрева котлов П-67 Березовской ГРЭС, БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2 и котла ПК-38 Назаровской ГРЭС от условий процесса обдувки (под условиями подразумевается не только различие по параметрам обдувочной среды, но и конструкции обдувочного аппарата) с указанием требуемой площади обдувки для достижения максимального эффекта очистки.

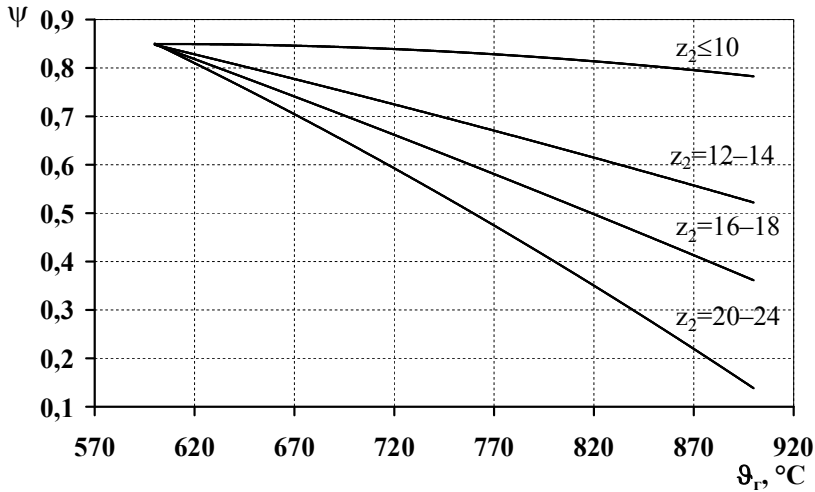


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента тепловой эффективности от температуры газов и количества рядов (z_2) конвективных поверхностей нагрева котла БКЗ-500-140 ст. №6 Красноярской ТЭЦ-2 при изменении нагрузки, проведенные на котлах П-67 (ст. №1, 2) Березовской ГРЭС и П-57 (ст. №9) Рефтинской ГРЭС.

Установлено, что влияние нагрузки котла в диапазоне 50–80 % от номинальной (что соответствует температуре газов 700–820 °С и их скорости 7,5–11,5 м/с) на значение коэффициента тепловой эффективности конвективного пароперегревателя связано в большей степени с изменением скорости газов, а в меньшей – с процессом загрязнения. В диапазоне 80–100 % (что соответствует температуре газов 820–900 °С и их скорости 11,5–14 м/с) в значительной степени на тепловую эффективность конвективных поверхностей нагрева оказывает влияние интенсивность роста золошлаковых отложений. Данный вывод хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями изменения коэффициента тепловой эффективности и скорости газов от температуры газов (рис. 6). Эти выводы также подтверждаются результатами тепловых испытаний котла П-57 (ст. №9) Рефтинской ГРЭС.

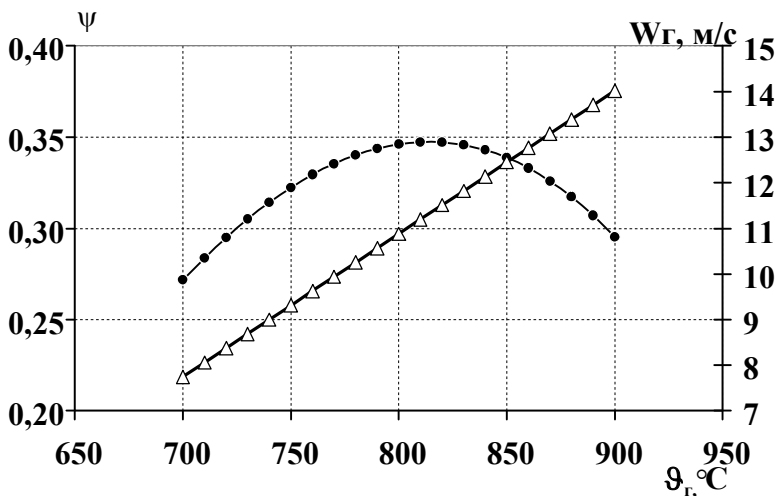


Рисунок 6 – Изменение коэффициента тепловой эффективности и скорости газов конвективного пароперегревателя котла П-67: Δ – скорость газов; \bullet – коэффициент тепловой эффективности

Особое внимание в работе уделено влиянию шлакующих свойств сжигаемого топлива на тепловую эффективность поверхностей нагрева паровых котлов. На рисунке 7 представлено изменение коэффициента тепловой эффективности конвективных и полурadiaционных поверхностей нагрева в зависимости от

Следует отметить, что в нормативных документах рекомендуется при тепловом расчете котла на нагрузках ниже номинальных использовать те же значения, что и при номинальных. Однако несовершенство данных рекомендаций, особенно для конвективных поверхностей нагрева, подтверждают результаты экспериментальных исследований по изменению тепловой эффективности поверхностей нагрева при

склонности к образованию кальциевых отложений ($R_{CaO} = 0,38-0,7$). Данная зависимость показывает, что интенсивность образования кальциевых отложений определяется расположением поверхностей нагрева по газовому тракту. Так для конвективных поверхностей нагрева изменение шлакующих свойств топлива приводит к изменению ψ на 0,01–0,04, то для ширмовых поверхностей нагрева это влияние составляет 0,04–0,07.

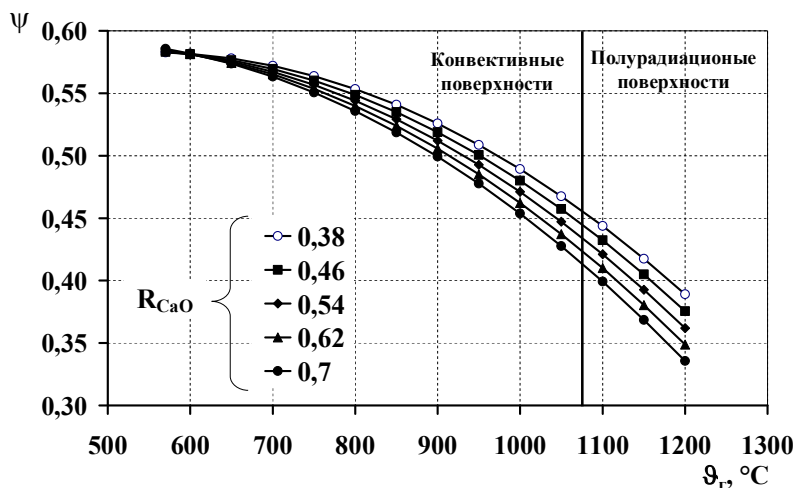


Рисунок 7 – Влияние шлакующих свойств, сжигаемого топлива на показатели тепловой эффективности

был выбран котел П-67, так как на этом котле сжигается наиболее шлакующий уголь. На рисунке 8, на примере конвективных поверхностей нагрева котла П-67 представлен характер изменения относительной погрешности определения коэффициентов тепловой эффективности от температуры газов, полученных при помощи нормативной зависимости и экспериментально-расчетных кривых (4).

Анализ полученных результатов, позволяет сделать вывод, что в зоне высоких температур газов (свыше 600 °C) значения ψ , найденные при помощи нормативных зависимостей, значительно превышают фактические значения ($\delta = 25-30\%$), в свою очередь, значения ψ , полученные с помощью предложенных в

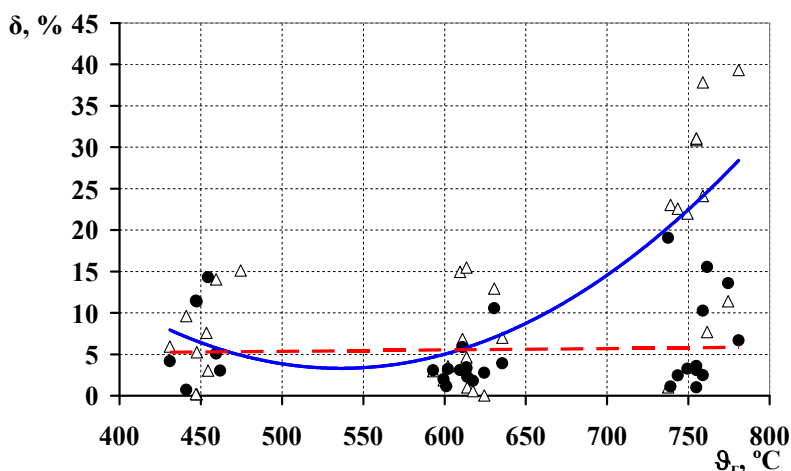


Рисунок 8 – Изменение относительной погрешности определения тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева котла П-67 Березовской ГРЭС, найденных при помощи нормативных и экспериментально-расчетных кривых: Δ – по данным НТР; \bullet – экспериментально-расчетные данные

работе регрессионных зависимостей отличаются от фактических не существенно. В зоне умеренных температур газов (450–600 °C), значения ψ , полученных при помощи нормативных и экспериментальных данных, имеют близкую сходимость с фактическими значениями. Выявленные результаты подтверждают тот факт, что нормативные значения определялись на лабораторных стендах и на существ-

ующих котлах. Для подтверждения достоверности полученных экспериментальных кривых выполнена сравнительная оценка значений коэффициентов тепловой эффективности полученных на основе нормативных и экспериментальных данных, с фактическими значениями, найденных по результатам балансовых испытаний. В качестве сравнительного объекта

вующих паровых котлах, при низкой температуре газов с последующей линейной экстраполяцией на более высокие температуры.

Таким образом, экспериментально установлено существенное отличие нормативных и действительных значений коэффициентов тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов и выявлены новые многофакторные зависимости показателей тепловой эффективности от температуры газов и рабочей среды, числа рядов по ходу газов, нагрузки котла и применяемых средств очистки, что существенно повышает качество проектных решений, наладочных работ, а также систем контроля и технической диагностики.

В четвертом разделе представлено практическое применение экспериментально-расчетных исследований тепловой эффективности поверхностей нагрева для решения проектных, прогнозных и управленческих задач при создании, модернизации и эксплуатации пылеугольных котельных агрегатов.

Экспериментально установленное отличие нормативных и фактических значений коэффициентов тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов позволяет уточнить действительное тепловосприятие и соответствующую ему площадь поверхности, и, как следствие, оценить капитальные затраты на стадии проектирования или сократить режимные ограничения котла при его эксплуатации.

Использование полученных в работе многофакторных зависимостей для оценки ψ дает возможность получать рациональные проектные решения, подбирая наиболее оптимальное расположение проектируемой поверхности, как по газовому, так и по пароводяному тракту в зависимости от проектно обоснованной величины коэффициента тепловой эффективности. Так например, при проектировании конвективных поверхностей нагрева котла, сжигающего березовский уголь, значение $\psi = 0,5$ можно обеспечить поддержанием средней температуры газов $\approx 640^\circ\text{C}$ и температуры пара $\approx 450^\circ\text{C}$ или достижением альтернативной комбинации – температуры газов $\approx 735^\circ\text{C}$ и температуры пара $\approx 300^\circ\text{C}$. Кроме того, при фиксированном значении температуры газов можно обеспечить требуемое значение ψ путем изменения площади живого сечения для прохода газов (числа поперечных рядов z_1 пакета). Например, на котле ПК-39 при сжигании экибастузского угля для конвективных поверхностей нагрева изменение скорости газов с 7 до 8 м/с влечет за собой изменения величины ψ на 4–7 %. В этой связи, при проектировании паровых котлов рекомендуется площадь поверхности нагрева определять на номинальную паропроизводительность, а оценку работы регулирующих органов на частичных нагрузках котла выполнять с учетом найденной зависимости ψ от скорости газов (рис. 6).

На рисунке 9 представлено расчетное отклонение площади конвективной поверхности нагрева обусловленное различием проектных значений коэффициентов тепловой эффективности от фактических, для котлов П-67 (Березовской ГРЭС), ПК-39 и П-57 (Рефтинской ГРЭС) и ПК-38 (Назаровской ГРЭС), использующих штатные средства очистки. Применение многофакторных аппроксимаций для оценки коэффициента тепловой эффективности с учетом температуры газов и рабочей среды, числа рядов по ходу газов, нагрузки котла и применяемых

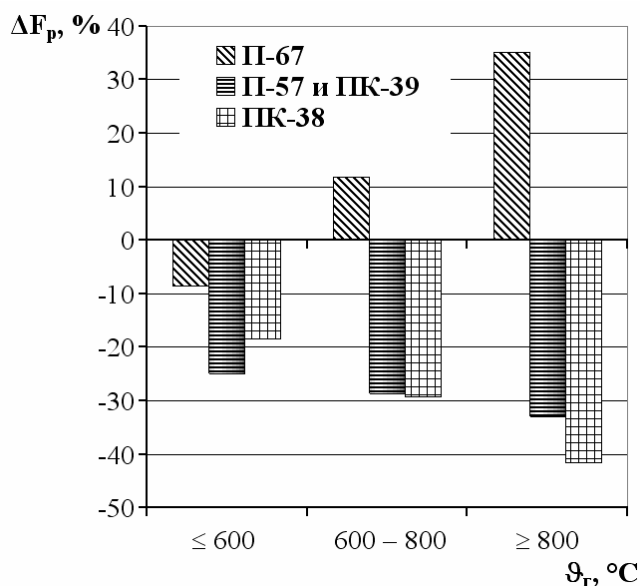


Рисунок 9 – Отклонение величины площади поверхности нагрева при применении нормативных и фактических зависимостей $\psi = f(\theta_r)$

динамики изменения $\psi(\tau)$ во времени и выявляет причины изменения ψ в процессе работы котла для каждой поверхности нагрева.

Вспомогательный модуль отвечает за определение оптимального времени включения средств очистки каждой поверхности нагрева котла. Предложено включение аппаратов очистки осуществлять не по абсолютной величине ψ , как это происходит в большинстве существующих систем диагностики, а по значению относительного изменения коэффициента тепловой эффективности в процессе эксплуатации $\delta\psi(\tau)$.

Принятие оперативных решений системой технической диагностики основано на использовании наиболее характерных значений коэффициентов тепловой эффективности всех поверхностей нагрева котла, определяющих эффективность их очистки: $\psi_{\min 1}$ – минимальное значение тепловой эффективности за контрольный межобдувочный ($\tau_{\text{обд}}$) период до проведения обдувки; ψ_{\max} – максимальное значение тепловой эффективности поверхности за контрольный межобдувочный период после проведения обдувки; $\psi_{\min 2}$ – минимальное значение тепловой эффективности за контрольный межобдувочный период после проведения обдувки (рис. 10).

Включение средств очистки происходит в том случае, если $\delta\psi(\tau)$ достигает предельного минимального значения $\delta\psi_{\min}^{\text{lim}} = \frac{\psi_{\min 2}}{\psi_{\max}}$, по условию сохранения эффекта очистки.

Если при очистке поверхности нагрева используется несколько обдувочных аппаратов, система определяет режим работы каждого из них. Критерием определения режима работы каждого аппарата является величина предельного максимума

эффекта очистки $\delta\psi_{\max}^{\text{lim}} = \frac{\psi_{\min 1}}{\psi_{\max}}$.

средств очистки позволяет существенно повысить качество и точность проектных решений (на 20–30%).

На основе усовершенствованной методики оценки тепловой эффективности разработан алгоритм функционирования системы технической диагностики шлакования и загрязнения полурадационных и конвективных поверхностей нагрева в режиме реального времени.

Система диагностики состоит из двух модулей – основного и вспомогательного. Основной модуль «ТЭФ» выполняет функцию определения величины ψ , оценку

При достижении текущего значения $\delta\psi(\tau)$ в процессе работы котла предельного уровня $\delta\psi_{\max}^{\lim}$ производится сравнение максимальных значений коэффициентов тепловой эффективности при проведении обдувки за прошедшие периоды $\tau_{\text{экс}}$, однако сопоставление происходит только в том случае, если за сравнительный период нагрузка котла не изменялась более чем на 20 %.

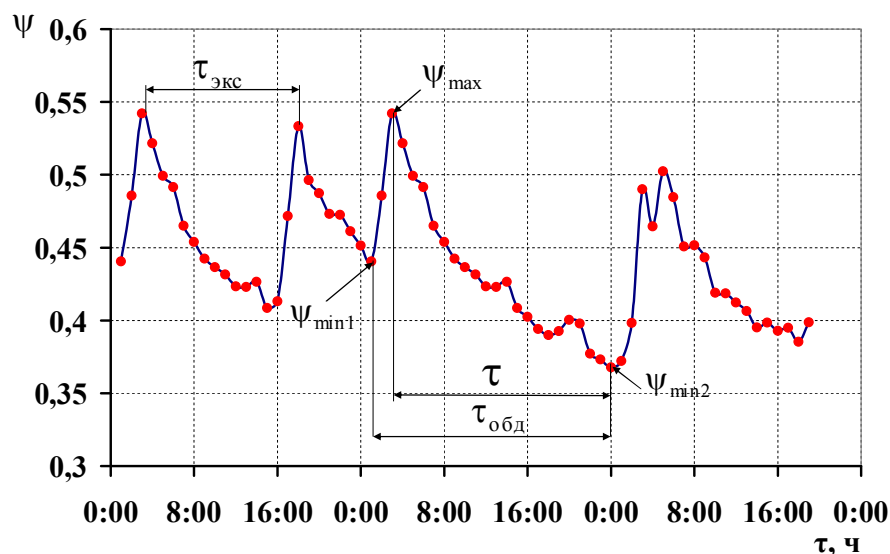


Рисунок 10 – Динамика изменения ψ поверхности ширмового первичного пароперегревателя второй ступени (ШПП-2) котла П-67 ст.№1 Березовской ГРЭС в режиме реального времени

Если изменений за анализируемый период не происходит и значение $\delta\psi_{\max}^{\lim}$ достигло необходимого предела и при этом величина $\delta\psi(\tau)$ не принимает оптимального значения, то производится включение оставшихся аппаратов очистки для обеспечения оптимального значения $\delta\psi_{\max}^{\lim}$.

Включение аппаратов очистки производится в определенной последовательности, которая устанавливается эмпирическим путем. Величины $\delta\psi_{\min}^{\lim}$, $\delta\psi_{\max}^{\lim}$ определяются индивидуально опытным путем для каждой поверхности нагрева по результатам испытаний и наладки котла и зависят от конструктивных характеристик поверхности нагрева, вида сжигаемого топлива и типа средств очистки. На примере ширмового первичного пароперегревателя второй ступени (рис. 10) котла П-67 Березовской ГРЭС представлен тренд изменения коэффициента тепловой эффективности, регистрируемый системой технической диагностики. Применение разработанной системы в режиме реального времени позволяет осуществлять очистку индивидуальных поверхностей нагрева не по штатному расписанию, а в зависимости от степени загрязнения.

На основе данных интенсивности изменения ψ в процессе загрязнения поверхностей нагрева разработан алгоритм прогнозирования времени следующей обдувки для каждой поверхности. Главным отличием разработанного алгоритма от известных является определение скорости изменения ψ в зависимости от фактических параметров.

Используя полученную зависимость интенсивности загрязнения поверхности нагрева, оперативно определяется время следующей обдувки, по уравнению:

$$\tau = b \sqrt[3]{\left(\delta\psi_{\min}^{\lim}\right)} - 1, \quad (5)$$

где τ – время до следующей очистки поверхности нагрева, ч; b – безразмерный коэффициент, характеризующий скорость загрязнения от режимных факторов и определяемый по уравнению множественной линейной регрессии:

$$b(w_r, \vartheta_r, t_{\text{ср}}) = a_0 + a_1 w_r + a_2 \vartheta_r + a_3 t_{\text{ср}}, \quad (6)$$

где w_r – скорость продуктов сгорания в расчетной поверхности, м/с; a_0, a_1, a_2, a_3 – параметры модели.

Разработанный алгоритм прогнозирования условий включения средств очистки используется для оперативной оценки эксплуатационной надежности поверхностей нагрева; оценки технико-экономических показателей работы котла; режима очистки и планирования краткосрочного ремонта котельного и вспомогательного оборудования.

В настоящее время алгоритмическое и программное обеспечение интегрировано в АСУ ТП котла П-67 Березовской ГРЭС для текущей оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева. На основе полученных результатов выполняется корректировка режимной карты работы аппаратов очистки широмовых поверхностей нагрева, что позволяет сократить затраты на обдувку на ≈ 800000 руб/год на два котла. Так же с помощью данной программы выполняется оценка эффективности проведения дробеочистки на котлах ПК-38 Назаровской ГРЭС. На котлах ст. №5А и 5Б проводились балансовые испытания при различной периодичности работы дробеочистки. Использование программного обеспечения ТЕФ позволило подтвердить возможность сокращения периодичности проведения дробеочистки с 6 до 4 раз в сутки с обеспечением требуемой надежной работы котла. Сокращения числа циклов включения дробеочистки привело к снижению годовых затрат на закупку дробы с 621 до 463 тыс. руб, а так же к снижению затрат тепла на 482,2 Гкал/год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Усовершенствованы методика и алгоритм определения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в режиме реального времени в части оценки коэффициентов теплопередачи чистой и загрязненной поверхности теплообмена, учитывающие конструктивные и режимные особенности, как отдельной поверхности, так и котла в целом, обеспечивающие адекватную оценку показателей тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов.

2. Экспериментально установлены зависимости влияния разности температуры газов и температуры рабочей среды (температуры стенки) на интенсивность загрязнения поверхностей нагрева паровых котлов с учетом типа теплообменной поверхности и вида сжигаемого топлива. Выявлено, что повышение температуры рабочей среды на $50\text{ }^\circ\text{C}$ при постоянной температуре газов приводит к уменьшению значений коэффициентов тепловой эффективности для конвективных поверхностей нагрева в среднем на 4,5–7 %, для полурadiaционных на 4–5 %.

3. Получены экспериментально-расчетные зависимости, определяющие влияние скорости газов, а также средств очистки и числа рядов по ходу газов (z_2) конвективного пароперегревателя на величину коэффициента тепловой эффективности от температуры газов. Так при увеличении скорости газов с 7 до 8 м/с коэффициент тепловой эффективности конвективной поверхности повышается в среднем на 4–6%. Установлено, что варьирование числа рядов z_2 приводит к изменению эффективной площади очистки поверхности нагрева. Так на примере котла БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2, сжигающего бородинский уголь, оснащенного паровыми глубоководными обдувочными аппаратами марки ОГ-8, получено, что значение ψ четвертой степени па-

роперегревателя ($z_2 = 10$) составило 0,69–0,85, при средней температуре газов 888 °С; третьей ступени ($z_2 = 20$) значение $\psi = 0,3–0,38$ при средней температуре газов 823 °С; первой ступени ($z_2 = 24$) значение $\psi = 0,543–0,625$, при средней температуре газов 725 °С.

4. Создан банк данных значений коэффициентов тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева при сжигании широкого класса бурых и каменных углей на котлах разных типов, использование которого в практике инженерных расчетов позволяет повысить точность определения площади поверхности нагрева с обеспечением необходимого регулировочного диапазона при создании новых, модернизации, реконструкции и наладке действующих паровых котлов.

5. На основе усовершенствованной методики разработано и внедрено в практику (котельный агрегат П-67 Березовской ГРЭС-1) алгоритмическое и программное обеспечение для выполнения оперативной оценки интенсивности шлакования и загрязнения полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов в режиме реального времени, что позволяет оптимизировать условия работы средств очистки и снизить затраты на проведение котлоочистных мероприятий, повысить экономичность и надежность работы оборудования.

6. Разработаны методика прогноза процесса шлакования и алгоритм применения средств очистки полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева от наружных отложений в режиме реального времени при различных режимах работы котла, основанные на анализе данных оперативного контроля показателей тепловой эффективности до и после использования обдувочных аппаратов, что позволяет повысить надежность и экономичность эксплуатации котла, а также эффективность применяемых средств очистки.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. **Янов, С. Р.** Обоснование применения экспериментально-расчетного подхода к оценке тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов / Е. А. Бойко, С. Р. Янов // Журнал Известия высших учебных заведений «Проблемы энергетики». №11-12. 2008. С. 3–12.

2. **Янов, С. Р.** Система диагностики шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов / П. Ю. Гребеньков, М.Н. Назаров, С.Р. Янов // Сб.: Всероссийской конференции по итогам Конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России». с. Дивногорское: 2005. С. 86–100.

3. **Янов, С. Р.** Сжигание угольной пыли «угрубленного» помола с нижним дутьем в котле П-67 / В. В. Белый, В. Н. Борисов, В. Ф. Петерс, С. Р. Янов и др. // Сб.: IV-ой Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири». г. Красноярск: 2005. С. 168–172.

4. **Янов, С. Р.** Диагностика шлакования и загрязнения поверхностей нагрева энергетических котлов / В. В. Белый, С. В. Порозов, В. Н. Борисов, С. Р. Янов и др. // Сб.: IV-ой Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири». г. Красноярск: 2005. С. 277–285.

5. **Янов, С. Р.** Влияние впрыска воды в топку на концентрацию оксидов азота при сжигании борозинского угля / В. А. Сысоев, Е. Г. Алфимов, П. Ю. Гребеньков, С. Р. Янов // Сб.: IV-ой Международной научно-технической конференции «Достижения и перспективы развития энергетики Сибири». г. Красноярск: 2005. С. 224–226.

6. **Янов, С. Р.** Диагностика загрязнения полурadioионных и конвективных поверхностей нагрева / С. Р. Янов // *Материалы Всероссийской конференции – конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение»*. г. Томск: 2006. С. 355–360.

7. **Янов, С. Р.** Испытание котла П-67 после реконструкции топочно-горелочных устройств / В. Н. Борисов, С. М. Замышляев, В. Ф. Петерс, С. Р. Янов и др. // *Сб.: IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов»*. г. Челябинск. Т. 1. 2007. С. 105–115.

8. **Янов, С. Р.** Экспериментально-расчетное обоснование методики оценки показателей тепловой эффективности полурadioионных и конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов Т-образной компоновки (на примере котла П-67 Березовской ГРЭС-1) / Е. А. Бойко, С. Р. Янов // *Сб.: IV научно-практической конференции «Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов»*. г. Челябинск. Т. 2. 2007. С. 26–33.

9. **Янов, С. Р.** Испытание котла ТП-92 при паропроизводительности выше 500 т/ч / М. Н. Назаров, С. Р. Янов // *Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города»*. г. Красноярск. 2008. С. 42–49.

10. **Янов, С. Р.** Разработка алгоритма и программного обеспечения для оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в режиме реального времени / С. Р. Янов // *Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города»*. г. Красноярск. 2008. С. 50–56.

11. Свидетельство РФ №2008613017. Программно-вычислительный комплекс для расчета выгорания и теплообмена в пылеугольных топках паровых котлов / Е. А. Бойко, С. В. Пачковский, П. В. Шишмарев, С. Р. Янов и др. // *Регистр*. 23.06.2008.

12. **Янов, С. Р.** Анализ факторов тепловой эффективности конвективных и полурadioионных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов / С. Р. Янов // *Сб.: III-го Всероссийского конкурса молодых специалистов инженерингового профиля в области электроэнергетики*. с. Дивноморское. 2009. С. 213–223.

13. **Янов, С. Р.** Результаты испытаний котла П-67 блока 800 МВт / В. В. Васильев, В. Н. Борисов, В. Н. Петров, С. Р. Янов и др. // *Сб.: Международной научно-технической конференции «Технологии эффективного и экологически чистого использования угля»*. г. Москва. 2009. С. 55–65.

14. **Янов, С. Р.** Сжигание непроектных топлив / В. В. Васильев, Е. М. Жадовец, П. Ю. Гребеньков, С. Р. Янов и др. // *Сб.: VII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива»*. г. Новосибирск: Т.1 2009. С. 73–80.

Янов Сергей Романович

**Разработка рекомендаций и мероприятий по обеспечению
тепловой эффективности поверхностей нагрева пылеугольных
паровых котлов**

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук

Подписано в печать 22.03.2010 г. Заказ № _____

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ИПК СФУ

660041, г. Красноярск, пр. Свободный 82а