

На правах рукописи



Осинцев Константин Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ  
РАЗНОРОДНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ПРИРОДНОГО ГАЗА  
В ТОПКАХ КОТЛОВ С ФРОНТАЛЬНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ ГОРЕЛОК**

Специальность: 05.14.14. – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Екатеринбург – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» энергетического факультета

Научный руководитель: доктор техн. наук, профессор  
Засл. деят. науки и техники РФ  
Торопов Евгений Васильевич

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, профессор  
Берг Борис Викторович  
  
кандидат техн. наук, доцент  
Агапитов Евгений Борисович

Ведущая организация: ОАО Инженерный центр  
энергетики Урала филиал  
«УралВТИ-Челябэнергосетьпроект»

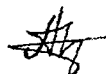
Защита состоится 19 февраля 2009 г. в аудитории Т-703 в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 при ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ им. Первого Президента РФ Б.Н.Ельцина» по адресу: г.Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5 (8-й учебный корпус ГОУ ВПО УГТУ-УПИ).

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ им. Первого Президента РФ Б.Н. Ельцина».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим присылать по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, К-2, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ им. Первого Президента РФ Б.Н.Ельцина, ученому секретарю. Телефон (343) 375-45-74, факс (343) 326-45-62, e-mail: lta\_ugtu@mail.ru. osintsev2008@yandex.ru.

Автореферат разослан «15» января 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук

 Аронсон К.Э.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Принятая распоряжением Правительства Российской Федерации 28.08.2003 г. № 1234-р «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года» определила основные направления государственной энергетической политики и перспективы развития топливно-энергетического комплекса страны, ориентируя экономику страны на замедление роста потребности в природном газе и нефтепродуктах при увеличении потребления угля. В условиях истощения местных угольных бассейнов, энергокомпаниями наряду с потреблением природного газа рассматриваются вопросы перехода к привозным источникам топливоснабжения. В Уральском регионе после более чем полувековой промышленной добычи челябинского бурого угля с проектными и близкими к нему характеристиками сегодня производят довыработку пластов, в которых более чем в 1,5 раза увеличено содержание балласта и уменьшена теплота сгорания. При использовании на ТЭС такой топливной массы помимо сверхнормативного износа рабочих органов мельничных устройств происходит активное загрязнение топок и газоходов, снижение паропроизводительности, ухудшение технико-экономических и экологических показателей котлов. Попытки замещения челябинского бурого угля ухудшенного качества привозным топливом с теплофизическими характеристиками зольного остатка, отличающимися от проектных, не дали положительных результатов как из-за высокой стоимости топлива, так и из-за ухудшения технико-экономических и экологических характеристик котлов и ТЭС в целом. Последние могли быть улучшены только после серьёзной реконструкции оборудования с большими капитальными вложениями, причём для каждого угля потребовались бы свои изменения конструкции горелочных узлов ввода в топку топлива и окислителя, систем топливopодачи, пылеприготовления, эвакуации золы, шлака, газов.

Совместное сжигание природного газа и низкосортного твёрдого топлива по существующим технологиям вызывает много дополнительных технических проблем с устойчивостью зажигания и выгоранием топливных частиц, активизацией загрязнения и надёжностью горелочных амбразур, экранов и пароперегревателей.

Актуальными становятся разработка и применение универсальной технологии сжигания разнородных топлив, обеспечивающей повышенную надёжность, высокие технические и экологические показатели котлов, а также горелочных устройств для её реализации с системой управления по изменению режимов горения в моменты перехода с одного вида топлива на другой без существенного вмешательства в конструкции узлов ввода реагентных потоков в топку.

Успешное решение этой актуальной задачи должно начинаться с предварительного изучения особенностей факельного сжигания разнородных твердых топлив и природного газа по существующим технологиям на натуральных котлах; по результатам этих исследований можно определить безопасные тепловые и газодинамические условия протекания топочных процессов и

перейти к разработке новых технологий и устройств. Объем данной работы, в соответствии с планом госбюджета на научно-исследовательские разработки ЮУрГУ, ограничен исследованиями, анализом и новыми разработками технологий сжигания топлива применительно к схеме фронтального ввода в топку реагентных потоков. По такой схеме работает большое количество котлов Уральского региона, сжигая различные угли и природный газ.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является разработка надежной технологии факельного сжигания разнородных топлив в топке с фронтальным размещением универсальных горелочных устройств при пониженном выходе оксидов азота в продуктах сгорания. Поставленная цель достигалась решением следующих задач:

- всесторонним анализом характеристик факела, надёжности, технических и экологических показателей котлов при существующей организации взаимодействия реагентных потоков в топках с фронтальным размещением горелок;

- сравнительным анализом влияния способов ввода реагентных потоков и вида сжигаемого топлива на структуру факела и показатели экономичности, надёжности и выход оксидов азота в продуктах сгорания в топках с фронтальной компоновкой горелок;

- разработкой технологии факельного сжигания разнородных видов топлива и конструкции горелочных устройств с системой управления характеристиками факела, обеспечивающей возможность перенастройки режимов горения при переходе с одного вида топлива на другой;

- разработкой рекомендаций по проектированию, применению и эксплуатации новых горелочных устройств с универсальными узлами ввода реагентных потоков в топку.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Основные научные положения, выводы, рекомендации обоснованы результатами испытаний на промышленных объектах и пилотных установках, анализом экспериментальных данных. При разработке новой технологии сжигания разнородных топлив и управления факелом в зоне активного горения топки использованы закономерности воспламенения и выгорания отдельных частиц, интегральное тепловыделение которых включено в баланс теплоты участка экзотермического окисления основной массы топлива. Достоверность результатов обусловлена широким диапазоном объектов исследований и их параметров, удовлетворительным совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований автора, сопоставлением и подробным анализом известных зависимостей.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- предложено структурное разделение зоны активного горения на участки воспламенения и накопления основного количества теплоты окислительных реакций;

- получены поправочные коэффициенты, рекомендуемые при проведении расчетов зоны активного горения топок по нормативному методу, а также

коэффициенты полиномиального распределения температуры и степени выгорания топлива по длине начального участка факела;

- разработана расчетная схема начального участка факела с учетом его тепловых характеристик, зависимостей тепловыделения от степени выгорания топлива и температуры по длине факела;

- экспериментально определен диапазон длины начального участка факела в топке котла БКЗ-210-140Ф, обеспечивающий безопасную работу горелочных амбразур и задних экранов;

- проведена экспериментальная проверка расчетной схемы изменения максимальных температуры и скорости газового потока по высоте участка охлаждения, получена хорошая согласованность теоретических и экспериментальных характеристик факела, расхождение результатов в пределах 5%;

- основные результаты диссертационной работы защищены 5 патентами.

#### **Практическая ценность работы состоит:**

- в использовании результатов проведенного анализа тепловых условий воспламенения и горения топливных частиц при разработке новых технологий и узлов ввода реагентных потоков в топку, обеспечивающих повышение срока службы горелок и снижение выхода оксидов азота;

- в разработке новых конструкций пылегазовых и газовых горелок с узлами рассредоточенного ввода реагентов в топку;

- в разработке новой технологии сжигания разнородных видов топлива с рассредоточенным вводом реагентов через узлы универсальных горелок, по патентной версии – “многофункциональных горелочных устройств”;

- в разработке рекомендаций по проектированию, наладке и эксплуатации новых горелочных устройств.

#### **Реализация результатов в промышленности.**

1. Расчет начального участка факела использован в проектах систем сжигания с многофункциональными горелками для котлов БКЗ-210-140Ф 1<sup>й</sup> и 2<sup>й</sup> очереди Челябинской ТЭЦ-2, а также в проекте реконструкции газовых горелок котлов ПК-33 Южноуральской ГРЭС.

2. Разработанная схема управления параметрами факела на начальном участке использована в рекомендациях по наладке и включена в режимную документацию котлов БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2.

3. Технология рассредоточенного ввода реагентных потоков в топку через узлы, размещенные в корпусе горелок, и конструкции многофункциональных горелок реализованы на котлах БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2, что подтверждается соответствующими актами использования результатов диссертационной работы.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на 58-60<sup>й</sup> научных конференциях ЮУрГУ (Челябинск, 2006-2008); на VI Всероссийской конференции “Горение твердого топлива” (с участием иностранных ученых), (Новосибирск, 2006); Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках” (Санкт-Петербург, 2007); IV научно-практической конференции Минеральная часть топлива, шлакование,

загрязнение и очистка котлов (Челябинск, 2007); Четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (Москва, 2008).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 19 печатных работ, из них 3 в источниках по списку ВАК, 5 в бюллетенях изобретений РФ.

**Личный вклад автора** заключается в самостоятельном анализе литературных данных; в проведении комплекса расчетов и экспериментальных исследований, обработке и обобщении результатов; участии в разработках новой технологии сжигания разнородных твердых топлив, конструкции горелок, рекомендаций по проектированию и эксплуатации горелочных устройств, наладке новых систем сжигания.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и рекомендаций, содержит 211 страниц текста, 41 рисунок, 16 таблиц, список литературы из 239 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность и формулируется цель работы.

**В первой главе** приводится анализ состояния проблемы, известных результатов исследований топочных процессов и методов управления параметрами среды в топках современных котлов.

Исследования факельных процессов проводятся на натуральных котлах и стендовых установках, связаны с изучением влияния на технические и экологические характеристики оборудования схем компоновки горелочных устройств, их конструкции и вида сжигаемого топлива. Структура факела, его скоростные и температурные поля во многом определяют степень надёжности оборудования ТЭС. Освоение факельной технологии сжигания топлива в энергетических котлах было связано с наиболее простой по условиям монтажа, ремонта и эксплуатации схемой подачи реагентов в топку через горелки, размещаемые на фронтальных стенах. Такие вопросы как шлакование, перегревы труб внутри камер сгорания, неустойчивость зажигания, плохое выгорание топливных частиц напрямую связывали с несовершенством газодинамических характеристик факела, а улучшение показателей горения – с необходимостью изменения конструкции горелок и схем их компоновки на стенах топочных камер. Усилия исследователей и проектантов при разработках новых мощных парогенераторов были сконцентрированы на улучшении экзотермического окислительного высокотемпературного процесса организацией встречного и тангенциального ввода потоков топлива и окислителя в топку. Дальнейший опыт наладки и эксплуатации котлов с такой технологией сжигания топлива показал, что проблемы с надёжностью оборудования такие же, как на котлах с фронтальной подачей реагентов в топку. В исследованиях экзотермических высокотемпературных процессов выделяют направление, связанное со спецификой организации сжигания топлива в камерных топках с различной компоновкой и конструкцией горелок и узлов ввода реагентных потоков. Из

многочисленных публикаций в этом направлении можно выделить работы сотрудников УГТУ-УПИ (А.П. Баскаков и др.)

Независимо от типа топочного устройства, схемы компоновки горелок, их конструкции и вида сжигаемого топлива все котлы объединяет общая проблема неравномерного распределения параметров в топке, главным образом, превышение средних расчётных значений температуры факела в зоне активного горения и в выходном окне топки на 150-250 К, рис.1. На рис.1 относительная ширина газохода  $\bar{A} = x/L$ ,  $x$  - текущее значение ширины газохода. В этих областях факела локализуется шлакование и перегреваются трубы экранов и пароперегревателей. Для борьбы с неравномерностью используют различные мероприятия, среди которых наиболее распространены сосредоточенный и рассредоточенный способы ввода дымовых рециркулирующих газов в топку. Однако в отсутствии чётких представлений о связи

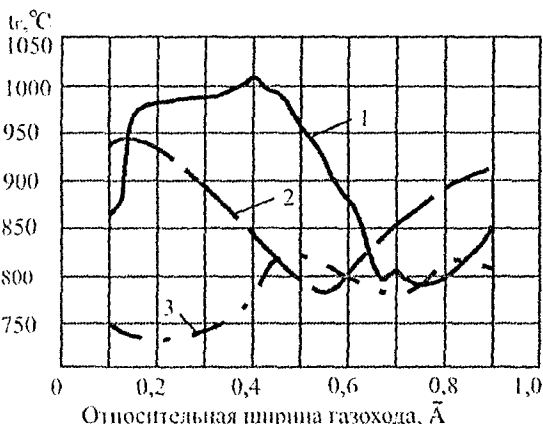


Рис.1. Распределение температуры по ширине поворотных газоходов мощных котлоагрегатов:  
 1 - котел П-57, A=22м;  
 2 - котел ПК-39, A=10,8;  
 3 - котел ТПП-200, A=28м  
 (по данным ВТИ)

схем включения горелок с температурными полями в топке эти методы часто оказываются малоэффективными.

Существующий парк котлов малой и средней мощности сегодня требует частичного или полного обновления по выработанному ресурсу. Эти обновления должны учитывать и характеристики топлив новой топливной базы, и требования сохранения или увеличения единичной мощности, а также повышения надёжности и экономичности, улучшения экологических характеристик ТЭС.

Проектируемые системы сжигания топлива и конструкции горелок целесообразно увязывать с заранее выясненными картинками развития факела в тонках, способами управления его параметрами при переходах с одного вида используемого топлива на другой.

**Во второй главе** проводится детальный анализ особенностей протекания факельных процессов и новых разработок, который привязан к конкретной газодинамической схеме с фронтальной подачей потоков топлива и окислителя в топку. Рассмотрены особенности протекания внутритопочных процессов, поля температуры и скорости в тонках с фронтальной компоновкой горелок.

Показано, что в таких топках ветвь факела с выгоревшим на 85-95% топливом смещена к задней стене. Слой факела с максимальными значениями параметров, в том числе с опасными по условиям надежности значениями температуры, отстоит от задней стены топки на расстоянии 0,15-0,20 ее глубины, рис.2.

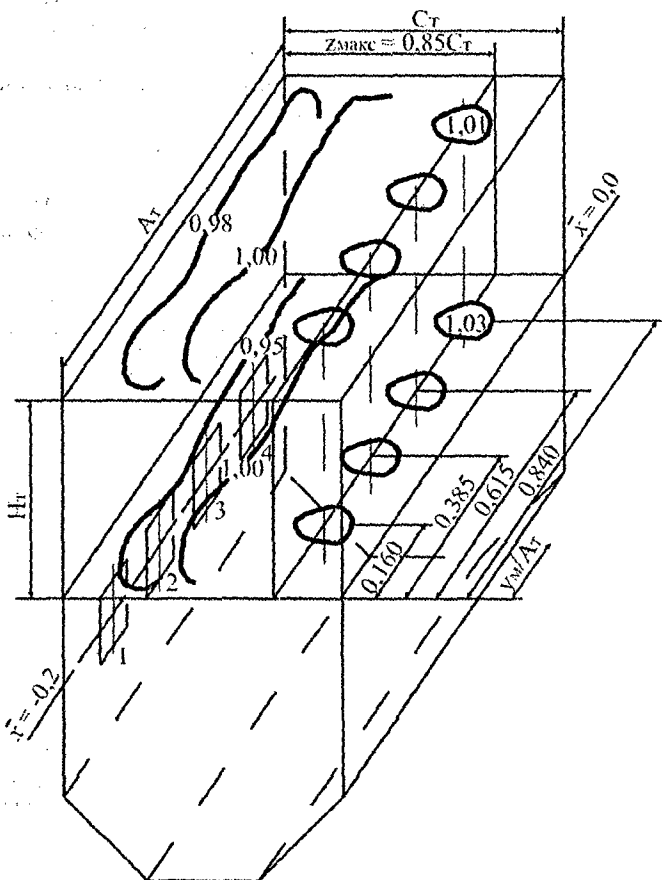


Рис.2. Поля безразмерной температуры на слабонеизотермической модели топки котла с фронтальной компоновкой горелок (результаты исследований УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ) На рис.2  $A_T$ ,  $C_T$  и  $H_T$  - соответственно ширина, глубина топки и высота зоны охлаждения, м;  $z_{max}$  - расстояние от среза горелочных амбразур до зоны максимального тепловыделения, м;  $\bar{x}$  - высота относительно уровня расположения максимумов тепловыделения;  $y_n/A_T$  - текущее значение местоположения максимумов тепловыделения относительно ширины топки. 1,2,3,4 - номера горелок. Нестабильность условий ввода топливных и воздушных струй обуславливает неравномерность распределения скорости, температуры и



концентрации составляющих в продуктах сгорания. Наиболее значительные градиенты скорости  $\bar{W}_x$  и температуры  $\bar{T}$  внутри этой полосы формируются в режимах с отключением горелок, рис.3. Зона топки с участком охлаждения факела соответствует участку выравнивания неравномерности параметров.

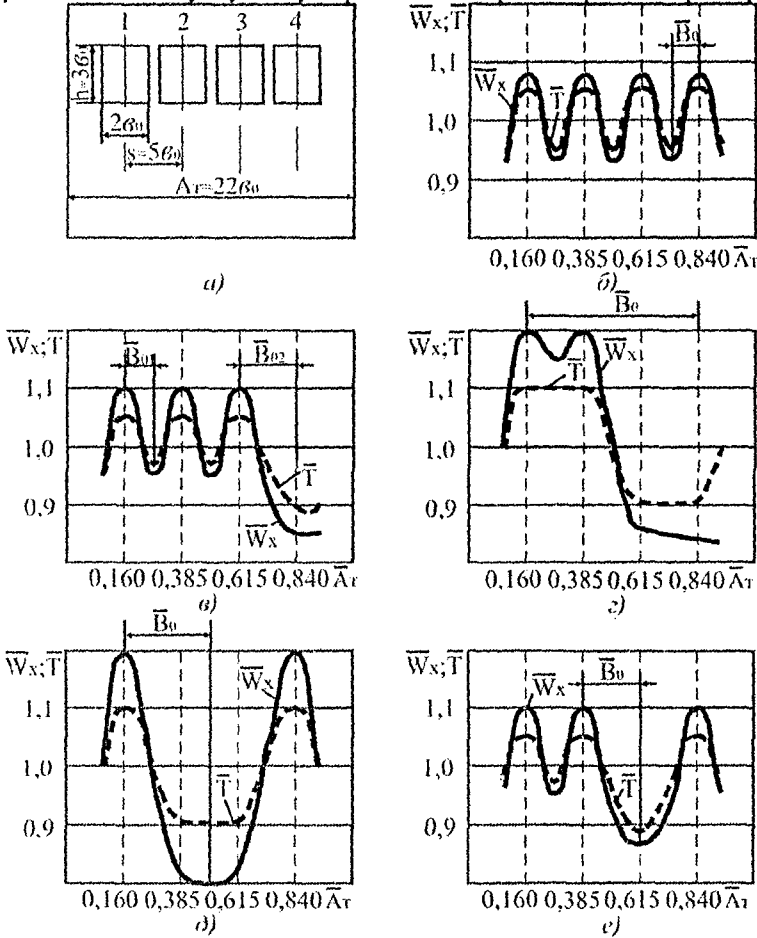


Рис.3. Распределения относительных скорости и температуры в плоскости  $z_{\max}$  (данные УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ): б – в работе все горелки; в,г,д,е – без горелок 4; 3 и 4; 2 и 3; 3; 1,2,3,4 – номера горелок

Для решения практических газодинамических задач по оценке уровня неравномерности в выходном окне топki с фронтальным вводом реагентов и привязке ее к схеме включения и способу загрузки горелок УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ была разработана двумерная модель течения.

С позиций теории турбулентных струй поля скорости, концентрации составляющих в продуктах сгорания и температуры в исходном сечении рассматриваются как результат взаимодействия системы струй, развивающихся в спутном потоке в условиях относительно слабого влияния на течение продольного и поперечного градиентов давлений. Поле скорости в исходном сечении может рассматриваться как результат истечения струй с начальной скоростью  $W_0 = W_{\text{макс}}$  в спутный поток со скоростью  $W_2 = W_{\text{спут}}$  из сопла с полушириной  $v_0$  при шаге между струями  $B_0$  и условии, что рассматриваемое сечение соответствует концу начального участка. В этом случае  $v_0$  и длина участка  $\ell_n$  могут быть определены по уравнениям:

$$v_0 = (0,416 + 0,134m)B_0 \quad (1)$$

$$\ell_n = \frac{B_0 \cdot (1 + m)}{0,27 \cdot (1 - m)} \quad (2)$$

где  $m = W_{\text{спут}}/W_{\text{макс}}$ .

При оценке сопоставимости результатов измерений полей температуры и скорости на слабонейзотермической модели и натурном образце получено качественное сходство распределения параметров, практическое совпадение относительной протяжённости полос неравномерности  $B_0$ , идентичность профилей в безразмерной избыточной форме  $\Delta\bar{W}, \Delta\bar{C}, \Delta\bar{T}$  у модели и натуре, хорошо описываемых соотношениями полиномиального вида, часто применяемыми в теории турбулентных струй:

$$\frac{W_\xi - W_{\text{спут}}}{W_{\text{макс}} - W_{\text{спут}}} = 1 - 6\xi^2 + 8\xi^3 - 3\xi^4; \quad (3)$$

$$\frac{T - T_{\text{сп}}}{T_{\text{макс}} - T_{\text{сп}}} = (1 - 6\xi^2 + 8\xi^3 - 3\xi^4)^{1/2}; \quad (4)$$

$$\frac{C - C_{\text{сп}}}{C_{\text{макс}} - C_{\text{сп}}} = (1 - 6\xi^2 + 8\xi^3 - 3\xi^4)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\xi = y/B_n$  - безразмерная координата по ширине потоков;  $W_\xi, T, C$  - текущие значения скорости, температуры, концентрации;  $W_{\text{макс}}, T_{\text{макс}}, C_{\text{макс}}$  - максимальные значения скорости, температуры, концентрации продуктов сгорания на границе потока при  $\xi=0$ ;  $W_{\text{сп}}, T_{\text{сп}}, C_{\text{сп}}$  - значения скорости, температуры, концентрации на границе потока при  $\xi=1,0$ , соответственно м/с, К, кг/м<sup>3</sup>.

Из анализа изменений скорости, температуры и концентрации компонентов продуктов сгорания по (3), (4), (5) следует, что при  $\xi=0$   $W_\xi = W_{\text{макс}}$ ,  $T = T_{\text{макс}}$ ,  $C = C_{\text{макс}}$ , а безразмерные параметры сохраняют постоянные значения

$$\Delta\bar{W} = \frac{W_\xi - W_{\text{спут}}}{W_{\text{макс}} - W_{\text{спут}}} = 1,0; \quad \Delta\bar{T} = \frac{T - T_{\text{сп}}}{T_{\text{макс}} - T_{\text{сп}}} = 1,0; \quad \Delta\bar{C} = \frac{C - C_{\text{сп}}}{C_{\text{макс}} - C_{\text{сп}}} = 1,0. \quad \text{При } \xi=1,0$$

$$W_\xi = W_{\text{спут}}, \quad T = T_{\text{сп}}, \quad C = C_{\text{сп}}, \quad \Delta\bar{W} = 0, \quad \Delta\bar{T} = 0, \quad \Delta\bar{C} = 0.$$

При отсутствии факторов растечки в третьем направлении, наличия горения и охлаждения, принимается, что поток в полосе  $B_0$  движется по законам сохранения массы, количества движения и энергии. Считая далее постоянными ширину этой полосы при движении факела к выходному окну

топки, а также интенсивность турбулентного обмена в поперечном направлении, плотность и давление в силу незначительного изменения последних составляют уравнения количества движения и энергии для границы с минимальными значениями параметров.

Решение последних с учётом всех перечисленных условий даёт зависимости УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ:

$$\epsilon n \frac{\bar{W}_{\max}^0 - 1}{\bar{W}_{\max}^0 - 1} - 3,33 \frac{\bar{W}_{\max}^0 - \bar{W}_{\max}^0}{(\bar{W}_{\max}^0 - 1)(\bar{W}_{\max}^0 - 1)} = -111,2 \cdot \chi \cdot \bar{x}; \quad (6)$$

$$\epsilon n \frac{\bar{T}_{\max}^0 - 1}{\bar{T}_{\max}^0 - 1} = \frac{1}{Pr} \left( 2,4 \epsilon n \frac{\bar{W}_{\max}^0 - 1}{\bar{W}_{\max}^0 - 1} + 6,6 \epsilon n \frac{\bar{W}_{\max}^0}{\bar{W}_{\max}^0} + 8,97 \epsilon n \frac{\bar{W}_{\max}^0 - 0,349}{\bar{W}_{\max}^0 - 0,349} \right), \quad (7)$$

где  $\bar{W}_{\max}^0 = W_{\max} / W_0^{cp}$ ,  $\bar{T}_{\max}^0 = T_{\max} / T_0^{cp}$  - текущие значения безразмерных максимальных скорости и температуры в направлении движения;  $\bar{W}_{\max}^0 = W_{\max}^0 / W_0^{cp}$  и  $\bar{T}_{\max}^0 = T_{\max}^0 / T_0^{cp}$  - начальные значения безразмерных максимальных скорости и температуры;  $W_0^{cp}$  и  $T_0^{cp}$  - средние значения скорости и температуры в исходном сечении, м/с, К;  $\bar{x} = x / B_0$  - безразмерная продольная координата;  $\chi, Pr$  - коэффициент турбулентного обмена и число Прандтля. Оценка опытных значений коэффициентов турбулентного обмена, проведенная УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ в канале прямоугольного профиля в отсутствии растечек в третьем направлении, горения и охлаждения дала  $\chi \approx 0,0185$  и  $Pr \approx 0,7$ .

При расчете исходное состояние неравномерности потока вблизи задней стены топки фиксируется в сечении верхней границы зоны активного горения с привязкой к схеме включения горелок, а расчет производится в полосе турбулентного перемешивания между координатами с максимальными и минимальными значениями параметров. На расчеты турбулентного перемешивания потоков и параметров вводятся поправки на растечку потока в третьем направлении объема топки, дожигание, лучистый теплообмен.

Сравнение результатов расчета двухмерного течения с реальными данными, полученными УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ на слабонеизотермических моделях топок и натуральных котлах, дает поправки на растечку потока:

$$W_{\max}^0 \approx W_{\max} \cdot e^{-\alpha_1 \cdot x / B_0}, \quad (8)$$

$$T_{\max}^0 \approx T_{\max} \cdot e^{-\alpha_2 \cdot x / B_0}, \quad (9)$$

где  $\alpha_1 \approx \alpha_2 = 0,035 - 0,220$ , зависит от схемы включения горелок.

Слабоинтенсивное горение и лучистый теплообмен с экранами топки обуславливает необходимость введения второй комплексной поправки:

$$T_{\max}^{0(кор)} \approx T_{\max} \cdot e^{-\beta \cdot x / B_0}, \quad (10)$$

где  $\beta \approx 0,1$  для очень большого исследованного УралВТИ-ЮУрГУ топочного парка, в том числе для котла БКЗ-210-140Ф.

Авторские исследования на слабонеизотермической модели топки котла БКЗ-210-140Ф и натурном объекте при различных конструкциях и схемах ввода потоков подтвердили и наличие растечки, и необходимость введения отмеченных поправок. Специалистами УралВТИ было показано, что выделяемые полосы  $B_0$  следует ограничивать по периферии: 0,1 м для

исключения влияния на расчеты пограничного турбулентного слоя и до 2,0 м для исключения влияния на достоверность поправки (10) пограничного радиационного слоя.

В дальнейшем уже автором совместно с сотрудниками кафедры ПТЭ ЮУрГУ и Челябинской ТЭЦ-2 было показано, что изменения конструкции горелок, а также переход на другое топливо, не нарушая общей газодинамической картины и распределений температуры относительно средней величины как в зоне активного горения, так и на выходе из топки, могут изменить сами средние значения, а значит, и значения локальных максимумов, вызвать все те же последствия со шлакованием и перегревом труб.

В третьей главе рассмотрены особенности протекания факельных процессов в топках с фронтальной компоновкой горелок при изменениях способа ввода и состава реагентных потоков, влияние мероприятий по снижению выхода оксидов азота - различных схем рассредоточения окислительных потоков в топку на параметры факела и надежность котлов.

Если при отыскании связей между возникающей в зоне дожигания неравномерностью и схемами включения горелок в работах УралВТИ-МЭИ-ЮУрГУ, в основном удовлетворительно использована методика слабонезотермического моделирования, то ответ на вопрос о степени и характере влияния конструкции горелок и вида сжигаемого топлива на параметры факела в зоне активного горения и показатели надежности и экономичности даже при условии фиксированного размещения горелок на стенах топки можно получить только на натурном объекте. Эффективность схем ввода реагентов в объем топки определяется показателями работы котла. Ни физические модели, даже с очень высокой степенью неизотермичности, ни математические, в том числе с самыми современными компьютерными программами, не имея исходной реальной базы предмета и условий моделирования, пока не могут дать оперативный ответ о поведении факела и поверхностей нагрева на участке воспламенения и формирования неравномерностей в зоне активного горения, его тепловых и геометрических характеристиках, а также их изменениях при переходе от одного вида топлива к другому. В связи с этим ЮУрГУ, ОАО ИДЦ, ЧТЭЦ-2 с участием автора диссертации проведены испытания топок котлов БКЗ-210-140Ф на ЧТЭЦ-2, которые подтвердили наличие связи между конструктивным оформлением узлов ввода, составом реагентных потоков и характером протекания окислительных реакций в зоне активного горения. Внутри этой зоны выделяется участок с резкоградиентным изменением параметров факела, связанным с протеканием процесса экзотермического окисления топлива и повышением теплосодержания и температуры, рис.4. Этот участок размещен между амбразурами горелок и областью внутри топки с максимальной температурой  $T_{\phi}^{\max}$ .

При истечении смеси из существующих вихревых горелок длина этого участка не более 0,25м, из прямоточных с предвключенными шахтными сепараторами – не более 0,5м. Максимальная температура с учетом неравномерности при этом достигает  $T_{\phi}^{\max} = 1700-1800\text{K}$ , а относительно нормирован-

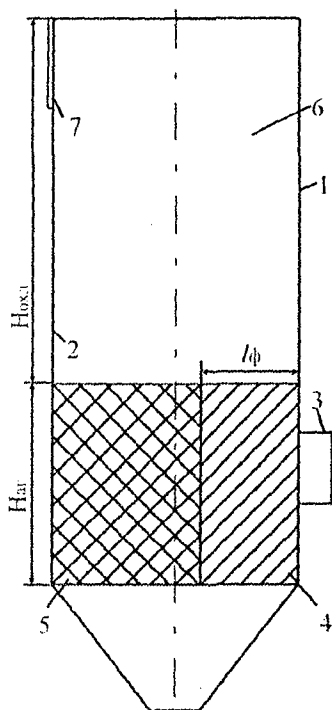


Рис.4. Схема выделения зон и участков развития факела в топке:

1,2 – фронтальная и задняя стены топки; 3 – горелки; 4,5 – зоны активного горения с участками воспламенения и максимального теплосодержания; 6 – зона охлаждения продуктов сгорания и дожига коксового остатка крупных частиц; 7 – выходное окно топки

на выходе из зоны активного горения на 150-250К, так и в выходном окне точечной камеры на 70-150К. При работе на угле в таких режимах практически прекращалось загрязнение экранов шлаковыми образованиями, а выход оксидов азота снижался до 390-450 мг/м<sup>3</sup>. При рассредоточении в горелках потоков воздуха и природного газа также наблюдалось смещение местоположения максимальной температуры факела в центральную часть топки и снижение ее значений на 100-150К, уменьшение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания до  $\leq 120$  мг/м<sup>3</sup>.

При попытках увеличения линейного размера начального участка более чем 3м при сжигании угля увеличивался мехнедожог топлива, а задняя стена вновь начинала активно шлаковаться, уменьшалась паровая нагрузка котла,

ного для бесшлаковочной работы топки параметра  $T_{\text{н}}$  она выше на 15-20%, рис.5. При сжигании пыли челябинского угля на котле БКЗ-210-140Ф, оснащенного горелками отмеченного типа, такой уровень температуры вызывает активизацию процесса загрязнения экранов задней стены с ухудшением теплопередачи, что вызывает активное загрязнение пароперегревателей. Существующие средства очистки поверхностей нагрева с загрязнениями не справляются. Приходится останавливать котлы для ручной механической очистки, снижать их нагрузку. Высокий уровень температуры факела вблизи горелок вызывает разогрев и разрушение обмуровки амбразур и узлов ввода. Срок службы горелок не более 2 лет. Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания на существующих котлах, оборудованных отмеченным типом горелок при сжигании угольной пыли 800-1200 мг/м<sup>3</sup>, а при сжигании природного газа – 280-350 мг/м<sup>3</sup>, рис.6.

При проведении экспериментов на котлах в период сжигания челябинского угля и газа было выявлено преимущество режимов с рассредоточенным вводом реагентных потоков через корпуса горелок. Такое рассредоточение, организуемое за счет вмешательства в конструкции горелок, обеспечивало смещение местоположения максимумов температуры от амбразур горелок на 1,5-2,0 м и снижение падающего теплового потока в их направлении. При этом снижались уровни и самой максимальной температуры факела как

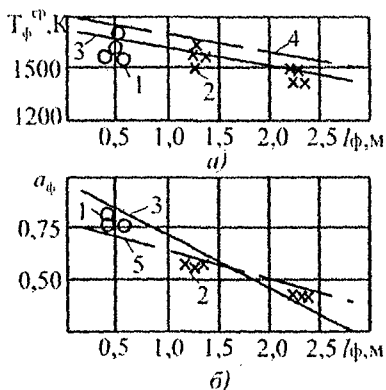


Рис.5. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей  $T_f=f(l_\phi)$ ,  $\alpha_\phi=\psi(l_\phi)$  при нагрузке  $D_{пп} = 170$  т/ч (0,8Дн),  $\alpha_s = 1,25$ ,  $\lambda \approx 1$  кВт/(м·К):  
 1 – заводские горелки котла БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 (эксперимент, данные ЮУрГУ, ЧТЭЦ-2).  
 2 – многофункциональные горелки котла БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 (эксперимент, данные ЮУрГУ, ЧТЭЦ-2).  
 3 – расчет по уравнению (12).  
 4 – расчет максимальной температуры с учетом неравномерности по рис.3.  
 5 – расчет по зависимостям В.И.Бабина.

концентрация оксидов азота в продуктах сгорания снижалась до 350-390 мг/м<sup>3</sup> при работе на угле, но за котлом появлялись следы СО. При сжигании природного газа концентрация NO<sub>x</sub> была ниже 70 мг/м<sup>3</sup>, но задняя стена загрязнялась сажей. Существовал оптимальный диапазон параметра  $l_\phi = 1,5-2,5$  м, обеспечивающий снижение температуры  $T_f$ , концентрации оксидов азота в продуктах сгорания и безопасную работу топочной камеры котла БКЗ-210-140Ф, который был рекомендован ЧТЭЦ-2 для реализации путем установки новых горелок на 1<sup>й</sup> очереди. При наладке новых горелочных устройств, выполненной силами ЮУрГУ, ОАО ИДЦ, ЧТЭЦ-2 с участием автора, определены конструктивные размеры сопловых узлов ввода реагентных потоков, реализующих диапазон параметра  $l_\phi = 1,5 - 2,5$  м в условиях котла БКЗ-210-140Ф, в частности, ширина вертикального щелевого пылевого сошла 0,35 - 0,45 м, диаметр отверстий полисоплового газовыпускного насадка 0,013 - 0,014 м, углы наклона вводимых реагентных потоков относительно горизонтальных осей горелок 0 - 10 град; ряд режимных характеристик занесен в режимные карты и инструкции по эксплуатации котлов, что отражено в актах использования результатов диссертационной работы.

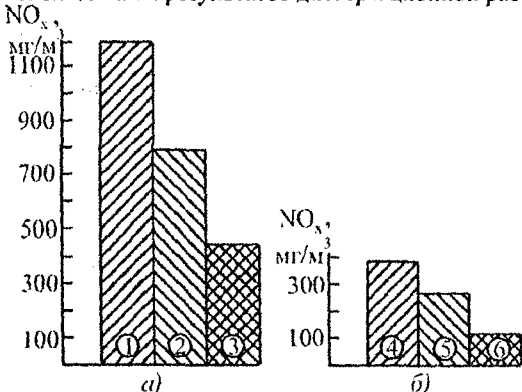


Рис.6. Уровень концентрации оксидов азота в продуктах сгорания котлов БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 (по результатам анализа ЮУрГУ-ИДЦ-ЧТЭЦ-2):  
 а – челябинский уголь,  
 б – природный газ;  
 1,4 – вихревые горелки котлов 2<sup>й</sup> очереди;  
 2,5 – прямооточные горелки с примыкающими гравитационными мельничными сепараторами;  
 3,6 – многофункциональные горелки.

При отработке тем же коллективом варианта конструкции газовой горелки с вынесенными соплами газа за габариты воздушного сопла определен угол наклона газовых сопел к воздушному 7 - 8 град, обеспечивающий снижение выхода оксидов азота до 120 мг/м<sup>3</sup> и сжигание газа без сажеотложений на стенах топки при коэффициенте избытка воздуха в топке  $\alpha^* = 1,11, 1,15$ .

В четвертой главе проведена расчетная оценка температурного уровня факела в зоне активного горения и на выходе из топки котла БКЗ-210-140Ф по существующему нормативному методу, применяемому при проектировании новых котлоагрегатов и поверочных расчетах существующих установок. Хотя расчет и не определяет местоположение максимальных теплосодержания и температуры факела в зоне активного горения, но дает возможность провести оценку средней температуры как на выходе из этой зоны, так и в выходном окне топки. Как и в проведенных опытах на котлах, расчетная оценка показала превышение температурных уровней факела в обозначенных областях топки, однако в сравнении с экспериментальными средними значениями расчетные оказались заниженными на 7-12% и не учитывали локальных максимумов по ширине топки. Большое количество исследователей указывают на протекание процессов воспламенения и тепловыделения основной массы топлива в зоне активного горения с резкоградиентными изменениями параметров факела вблизи горелок. Однако предпринимаемые ими попытки выделения специфических технологических зон ограничиваются зонами активного горения и охлаждения факела, принимаемыми в соответствии с нормативным методом.

В работах Д.М. Хзмаляна, а также В.И. Бабия и Ю.Ф. Куваева предлагается учитывать результаты исследований по выгоранию летучих и коксового остатка угольных частиц измельченных фракций для корректировки линейных размеров и конструкций камер сгорания, выбора безопасных по условию шлакования температурных уровней в зоне активного горения и в выходном окне топки. Попытка расчетно оценить работоспособность котла БКЗ-210-140Ф при сжигании пыли челябинского угля по отмеченному способу показала хороший уровень сходимости с нормативным методом по степени выгорания угольных частиц в зоне активного горения и за котлом. Нормативные значения средних уровней температуры также оказались заниженными по сравнению с данными экспериментов на 7-12%.

Четкие указания по расчетной оценке параметров  $\ell_{\phi}$  и  $T_{\phi}$  на начальном участке факела на период проведения исследований на котлах БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 в литературе отсутствовали. Автором предложено использовать известные закономерности и присмы расчета экзотермических эффектов реакций топливного окисления со следующими особенностями.

1. Принимается аналитическое и расчетное разделение топки на зоны активного горения и охлаждения:

- зона активного горения дополнительно делится на два горизонтальных участка: участок воспламенения и горения летучих и коксовой мелочи и

участок накопления основного количества теплоты окислительных реакций летучих и коксовых частиц;

- размеры зон, в том числе высота зоны активного горения с двумя выделенными участками, определяются в соответствии с нормами теплового расчета котельного агрегата.

2. Длина первого горизонтального участка в зоне активного горения факела  $\ell_\phi$  - расстояние от среза горелок до второго участка с максимальными значениями температуры факела  $T_\phi$  и теплосодержания  $q_\phi$ , рис.4.

3. На участке накопления основного количества теплоты окислительных реакций происходит дальнейшее выгорание топливных частиц при постоянной температуре.

4. Принимается приближенная схема распространения теплоты топливного окисления начального участка факела:

- в направлении, противоположном движению реагентов и сопутствующих инертных компонентов условной теплопроводностью (предложение Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого для очень слабо изученного физического конвективно-лучистого процесса тепломассобмена);

- к экранам теплоизлучением по нормативной методике теплового расчета зоны активного горения.

В соответствии с этим составляется тепловой баланс зоны воспламенения:

$$q_\tau = q_n + q_{\text{под}} - q_{\text{отв}}, \quad (11)$$

где  $q_\tau$  - поток теплоты в направлении поступления топливоздушнoй смеси;  $q_n$  - тепловыделение на участке воспламенения;  $q_{\text{под}}$  - подвод теплоты под-светочным топливом;  $q_{\text{отв}}$  - отвод теплоты экранам, кВт.

Уравнение (11) в преобразованном виде примет вид:

$$\lambda \cdot \frac{T_\phi - T_a}{\ell_\phi} \cdot F_\phi = a_\phi \cdot Q_n^r \cdot B_p + Q_{\text{под}}^r \cdot B_p^{\text{под}} - \sigma \cdot a_\tau \cdot T_\phi^4 \cdot \Sigma(\Psi F)_{\text{эк}}, \quad (12)$$

где  $\lambda$  - условный коэффициент теплопроводности, кВт/(м·К);  $T_a$  - температура начальная, усредненная для амбразур и поверхности экранов, принимается постоянной  $T_a \approx 900$  К;  $F_\phi = H^{\text{ак}} \cdot B_\tau$  - усредненное значение сечения начального участка, м<sup>2</sup>;  $H^{\text{ак}}$  - высота зоны активного горения, м;  $B_\tau$  - ширина камеры сгорания (стены с горелками), м;  $a_\phi$  - интегральная степень выгорания топлива;  $B_p$  и  $Q_n^r$  - расход и теплота сгорания топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг соответственно;  $B_p^{\text{под}}$  и  $Q_{\text{под}}^r$  - расход и теплота сгорания подсветочного топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-11}$  кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) - постоянная Стефана-Больцмана;  $a_\tau$  - степень черноты топki в зоне активного горения, принимается  $a_\tau \approx 0,9$ ;  $T_\phi$  - средняя температура факела в конце зоны воспламенения и условно постоянная на втором участке зоны активного горения (накопления теплоты реакций окисления топлива), К;  $\Sigma(\Psi F)_{\text{эк}}$  - комплекс эффективной поверхности тепловосприятия зоны активного горения по нормативной методике теплового расчета, м<sup>2</sup>.



Приняв параметр  $q_{\text{вм}} = 0$  в уравнениях (11), (12) произведем расчетную оценку зависимостей  $T_{\phi} = f(\ell_{\phi})$  и  $a_{\phi} = \Psi(\ell_{\phi})$  с использованием опытных значений условного коэффициента теплопроводности  $\lambda \approx 1$  кВт/(м·К), согласующихся с данными УралВТИ-КирНПО для кавакского угля и вихревых горелок в топке котла ТП-35 и коэффициентов эффективности экранов, входящих в выражение  $\Sigma(\Psi F)_{\text{эк}} \cdot \Psi_{\text{эк}} \leq 0,3$  для схем сжигания с исходными горелками ( $\ell_{\phi} \approx 0,5\text{м}$ ) и  $\Psi_{\text{эк}} \approx 0,5 - 0,6$  для схем сжигания с многофункциональными горелками ( $\ell_{\phi} \approx 1,5-2,5\text{м}$ ). На рис.5 приведены результаты расчета и опытные значения параметров  $T_{\phi}$  и  $a_{\phi}$ . Разброс опытных значений параметров составляет 5-7%. На том же рис.5 обозначены максимальные значения температуры факела с учетом неравномерности, определяемой по рис.3.

При более подробном изучении тепловых процессов на участке воспламенения полидисперсного факела с целью предварительного прогнозирования параметра  $a_{\phi}$  подтверждается возможность полиномиального описания изменения безразмерных температуры и степени выгорания по длине участка  $\ell_{\phi}$ , сделанное ранее в работах УралВТИ-КирНПО:

$$\Delta \bar{T} = \frac{T - T_0}{T_{\phi} - T_0} = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m}, \quad (13)$$

$$\bar{a} = \frac{a}{a_{\phi}} = \frac{q}{q_{\phi}} = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n}, \quad (14)$$

где  $\xi = \ell/\ell_{\phi}$  – безразмерная длина факела;  $\xi = 0$  на срезе горелки;  $\xi = 1,0$  на длине  $\ell = \ell_{\phi}$  с фиксированными максимумами температуры факела  $T_{\phi}$ ,  $K$ , и значением степени выгорания  $a_{\phi}$ ;  $T$  и  $T_0$  – текущее и начальное на срезе горелки значения температуры,  $K$ ;  $a$  – текущее значение степени выгорания топлива;  $m$  и  $n$  – опытные коэффициенты, которые зависят от вида топлива и фракционного состава пыли, для исследованных вариантов схем сжигания челябинского бурого угля и природного газа  $m \approx 5,0$  и  $n \approx 3,5$ .

Процессы прогрева и горения начинаются одновременно у всей массы пыли при входе в участок воспламенения, к отметке  $\ell_{\phi}$  на момент времени,  $\tau_{\phi}$  горение заканчивается лишь у мелких частиц, более крупные, прогорая неполностью, успевают отдать только часть теплоты.

Предельные максимальные размеры частиц по факту устойчивого воспламенения с последующим участием в процессе горения на первом участке до отметки  $\ell_{\phi}$  определяются на момент времени  $\tau_{\phi}$  по формулам В.И. Бабия – Ю.Ф. Куваева:

$$\delta_{\text{нп}} = \left( \frac{\tau_{\phi} \cdot (T_{\phi})^4}{k_{\text{нп}} \cdot 5,3 \cdot 10^{14}} \right)^{1/4}, \quad (15)$$

$$\delta_{\text{вп}} = \left( \frac{\tau_{\phi} \cdot (T_{\phi})^3}{k_{\text{вп}} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_p \cdot (21/O_2)^{0,4}} \right)^{1/12}, \quad (16)$$

где  $\tau_{\phi}$  – период протекания стадий воспламенения летучих и коксового остатка, с;  $T_c$  – температура газовой среды, как средняя величина между  $T_0$  и  $T_{\phi}$  из уравнения (13), К;  $T_c \approx 0,925 T_{\phi}$  для факела горелок исходной конструкции;  $T_c \approx 0,9 T_{\phi}$  для факела многофункциональных горелок;  $O_2$  – средняя доля кислорода в зоне воспламенения и горения;  $O_2 \approx 10\%$  для исходной конструкции горелок смешительного типа и  $O_2 \approx 5\%$  для многофункциональных горелок, настроенных на равномерное поступление кислорода к горящим топливным частицам;  $\rho_y$  – плотность угля,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_{kv}$ ,  $k_{ck}$  – кинетические константы;  $k_{kv} \approx 1,0$ ,  $k_{ck} \approx 1,3$  – для бурого угля по данным В.И. Бабия;  $n_1 = 0,50$  – опытный показатель для бурого угля.

Массовая доля воспламенившейся пыли определяется, исходя из распределения частиц в факеле:

$$D = 1 - \exp(-b \cdot \delta^{n_2}), \quad (17)$$

где  $b$  и  $n_2$  – опытные коэффициенты;  $\delta$  – текущий размер пылевой частицы, мкм.

Полное выгорание летучих для большинства видов топлива заканчивается в зоне активного горения, процесс горения кокса заканчивается в конце зоны охлаждения с интегральной степенью выгорания топлива  $a_{\phi}$  при температуре  $T_T$  в выходном окне топки.

Размеры частиц с полностью выгоревшими летучими и коксом определяются по формулам:

$$\delta_{2x} = \left( \frac{\tau_{\phi}}{k_{kv} \cdot 0,5 \cdot 10^9} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

$$\delta_{2x} = \left( \frac{\tau_{\phi} \cdot (T_c')^{0,9} \cdot O_2'}{k_{ck} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \rho_k \cdot (1 - A_k)} \right)^{1/2}, \quad (19)$$

где  $\delta_{2x}$ ,  $\delta_{2x}$  – исходные размеры частиц, у которых полностью выгорели летучие и кокс, м;  $\tau_{\phi}$  – время прохождения частицами участка от среза горелок до выходного окна топки, с;  $T_c'$  – средняя температура в топке, К;  $O_2'$  – средняя концентрация кислорода, в долях;  $O_2' \approx 5\%$  для систем сжигания с исходными горелками,  $O_2' \leq 1\%$  для систем сжигания с многофункциональными горелками;  $A_k$  – зольность кокса, в долях;  $\rho_k$  – плотность кокса,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_{kv}$ ,  $k_{ck}$  – кинетические константы;  $k_{kv} = 1,1$ ,  $k_{ck} = 1,4$  – для бурого угля по данным В.И. Бабия.

Массовая доля полностью выгоревшей пыли в топке и при необходимости интегральный остаток кокса определяются из распределения (17).

На момент времени  $\tau_{\phi}$  общая доля воспламенившихся коксовых частиц пыли челябинского бурого угля, исходя из зависимостей (16), (17), достигает  $a_c \approx 0,9$  при выходе и сгорании летучих ~ 100%.

Усредненная массовая доля выгоревших на момент времени  $\tau_{\phi}$  частиц от 0% до 100% составляет  $a_c^{mx} \approx 0,8$  для участка с  $\ell_{\phi} = 0,5\text{м}$  у исходной системы сжигания,  $a_c^{mx} = 0,5 - 0,6$  для системы сжигания с многофункциональными горелками. Условная расчетная степень выгорания топлива составит  $a_{\phi}^{poc} =$

$a_{\phi}^{мч} \cdot a_{\phi} = 0,72$  для исходной системы сжигания и  $a_{\phi}^{мч} = a_{\phi}^{нч} \cdot a_{\phi} \approx 0,5$  для новой системы сжигания.

Сравнение расчетных значений с реально получаемыми показателями степени выгорания на котле дает расхождение до 15% по системе сжигания топлива с исходными горелками и хорошее согласование по системе сжигания с многофункциональными горелками. Расхождение по параметру  $a_{\phi}$  в первом случае связано с существенным отклонением реальной схемы горения на начальном участке от расчетной из-за наличия сильной эжекции топочных газов непосредственно в горелочные амбразуры и смещением начального участка воспламенения вглубь горелки. Для подстановки значений  $a_{\phi}$  в расчетное уравнение (12) следует вводить соответствующую поправку  $a_{\phi} = a_{\phi}^{нч} \cdot K_{\phi} = 0,72 \cdot 1,15 = 0,83$ .

Предложенная расчетная схема получила практическое применение. В главе приводится анализ вклада составляющих теплового баланса участка воспламенения, возможностей регулирования параметров факела, оценка устойчивости воспламенения различных топлив и надежности конструкций амбразур, а также принципы перехода с одного вида топлива на другое в конкретных условиях котлов БКЗ-210-140Ф, оборудованных многофункциональными горелками. Разработаны рекомендации и рассмотрены конкретные примеры по проектированию и эксплуатации горелочных устройств с узлами рассредоточенного ввода реагентных потоков в топку данного котла для двухъярусной установки на одной из стен камеры сгорания. Рассмотрена возможность распространения рекомендаций на другие котлы с фронтальным рассредоточенным вводом реагентов через горелки.

Рассмотрен вопрос одновременного полного или частичного замещения челябинского угля другими видами твердого топлива с заменой изношенного котлового оборудования и использования многофункциональных горелок. При сильно отличающихся характеристиках используемого топлива его сжигание в одном топочном устройстве может быть организовано при различной тепловой нагрузке котла, рис.7:  $\bar{q}_1 = q_1/q_1^*$ , где  $q_1$  - нормированный показатель, МВт/м<sup>2</sup>;  $q_1^* = 1,15$  МВт/м<sup>2</sup> - нормированный показатель для кузнецкого угля марок СС;  $\bar{T}_{\omega} = T_{\omega}/T_{\omega}^{нч}$ ,  $\bar{T}_m^* = T_m^*/T_m^{нч}$  где  $T_{\omega}$ ,  $T_m^*$  - нормированные показатели, К;  $T_{\omega}^{нч} = 1773$ К,  $T_m^{нч} = 1423$ К - нормированные показатели для слабшлакующих кузнецких углей;  $\bar{D}_m = D_m/D_m^*$ , где  $D_m$  - расчетный показатель, т/ч;  $D_m^* = 320$ т/ч - расчетный показатель при сжигании природного газа.

Использование многофункциональных горелок, реализующих относительно стабильное тепловыделение на длине участка воспламенения  $\ell_{\phi} = 1,5-2,5$ м, позволяет осуществлять эксплуатацию котла с управляемой величиной нагрузки по задаваемому виду топлива. На ЧТЭЦ-2 в существующих ячейках котлов БКЗ-210-140Ф размещение котлов паропроизводительностью 320 т/ч для сжигания природного газа и кузнецкого слабоспекающегося угля, переход на челябинский бурый уголь потребует снижения нагрузки до 210 т/ч. При этом

уровень падающих тепловых потоков и температурный режим амбразур не изменится, что обеспечивает их длительную безаварийную работу.

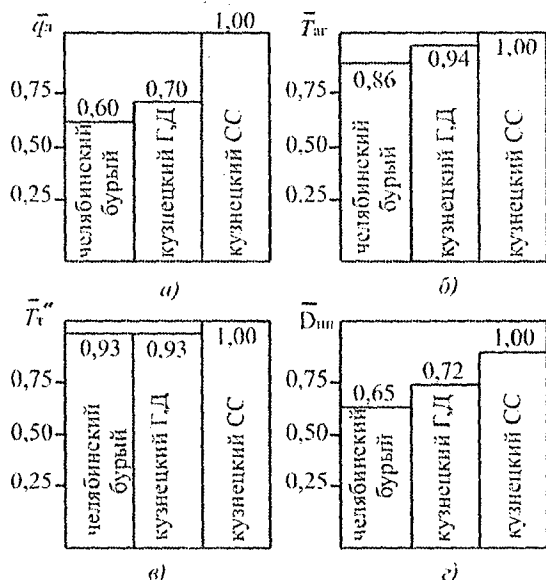


Рис. 7. Сравнение показателей факельного сжигания топлива в топке при сжигании углей с различными теплофизическими характеристиками: а - допустимое тепловое напряжение в зоне активного горения, б - допустимая температура в зоне активного горения, в - допустимая температура в выходном окне топки, г - допустимая эксплуатационная нагрузка котла, размещаемого в существующей строительной ячейке Челябинской ТЭЦ-2

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Характерной особенностью факельного процесса в топках является нарастание энтальпии и температуры реагентных потоков при их истечении из горелок. В топочных устройствах с фронтальной компоновкой горелок выделен участок факела длиной  $l_\phi$ , ограниченный горелочными амбразурами и областью с максимальным значением температуры  $T_\phi$  в центральной области топки. На котлах БКЗ-210-140Ф с проектными вихревыми горелками параметр  $l_\phi \approx 0,25$  м. На тех же котлах, оборудованных прямоточными горелками с предвключенными шахтными сепараторами  $l_\phi \approx 0,50$  м. Максимальная температура с учетом неравномерности при этом достигала  $T_\phi = 1700-1800\text{K}$ , что выше параметра  $T_{*}$ , рекомендуемого существующими нормами проектирования топок с твердым шлакоудалением, на 15-20%. Столь высокий уровень температуры при сжигании пыли челябинского угля вызывал активизацию процесса загрязнения экранов задней стены и пароперегревателей с ухудшением охлаждения продуктов сгорания. Поскольку существующие средства очистки поверхностей нагрева не позволяли осуществлять эффек-

тивное удаление загрязнений, котлы останавливали для ручной механической очистки, снижали их нагрузку. Повышенный уровень потока теплоты в направлении горелок приводил к активному разрушению обмуровки амбразур и узлов ввода реагентных потоков.

2. Экспериментами на котле БКЗ-210-140Ф был выявлен диапазон значений  $\ell_{\phi} = 1,5 - 2,5$  м, при реализации которого максимальная температура факела в зоне активного горения снижалась до  $T_{\phi} \approx 1450$  К, что соответствовало рекомендуемой величине  $T_{\phi}^*$  существующих норм проектирования топок с твердым шлакоудалением.

3. Для реализации выявленного безопасного диапазона  $\ell_{\phi} = 1,5 - 2,5$  м было разработано многофункциональное горелочное устройство, опробованное при различных вариантах исполнения и позволяющее менять длину участка воспламенения в широком диапазоне параметра  $\ell_{\phi}$ , обеспечивающее бесшлаковочное протекание факельного процесса в топке, более активное охлаждение продуктов сгорания, отсутствие загрязнений пароперегревателей, что привело к увеличению паровой нагрузки на 20-30%, сокращению аварийных остановов и продлению срока службы горелок до 12 - 16 лет против 2 лет для котлов с исходными горелками, то есть увеличению в 6 - 8 раз. Значения концентрации оксидов азота составили  $NO_x = 390 - 450$  мг/м<sup>3</sup> при работе на угле и  $NO_x \leq 120$  мг/м<sup>3</sup> при работе на природном газе против 800 - 1200 мг/м<sup>3</sup> при сжигании угольной пыли, 280 - 350 мг/м<sup>3</sup> при сжигании природного газа на тех же котлах с исходными горелками, то есть были снижены более чем в 2 раза.

4. При наладке новых горелочных устройств, выполненной силами ЮУрГУ, ОАО ИДЦ, ЧТЭЦ-2 с участием автора, определены конструктивные размеры сопловых узлов ввода реагентных потоков, реализующих диапазон параметра  $\ell_{\phi} = 1,5 - 2,5$  м в условиях котла БКЗ-210-140Ф, в частности, ширина вертикального целевого пылевого сопла 0,35 - 0,45 м, диаметр отверстий полисплового газовыпускного насадка 0,013 - 0,014 м, углы наклона вводимых реагентных потоков относительно горизонтальных осей горелок 0 - 10 град, ряд режимных характеристик, занесенных в режимные карты и инструкции по эксплуатации котлов, что отражено в актах использования результатов диссертационной работы.

5. При отработке варианта конструкции газовой горелки с вынесенными соплами газа за габариты воздушного сопла определен угол наклона газовых сопел к воздушному 7 - 8 град, обеспечивающий снижение выхода оксидов азота до 120 мг/м<sup>3</sup> и сжигание газа без сажеотложений на стенах топки при коэффициенте избытка воздуха в топке  $\alpha_r^* = 1,11 - 1,15$ .

6. В дальнейшем была проведена сравнительная оценка экспериментальных значений  $\ell_{\phi}$  и  $T_{\phi}$ , выполненная для условий того же котла с новыми и старыми горелками при сжигании челябинского и переславского бурых углей, природного газа и угольных отходов шихты электродного производства, которая дала расхождение результатов в пределах 5%.

7. Расхождение между полученными в расчете и эксперименте значениями  $\epsilon_{\phi}$  и  $T_{\phi}$  связано с предварительным заданием коэффициентов полиномов в принятых распределениях температуры и степени выгорания топлива по длине участка воспламенения  $m$  и  $n$ , других коэффициентов. Для разработанных горелок при сжигании бурого угля с высоким содержанием летучих, угольных отходов шихты электродного производства, природного газа и переясловского бурого угля  $m \approx 5,0$  и  $n \approx 3,5$ .

8. В процессе выполнения работы определены поправочные коэффициенты для расчета температуры в зоне активного горения  $K_r = 1,075$  для старых систем сжигания и  $K_r \approx 1,0$  для новых с многофункциональными и газовыми горелками.

9. В настоящее время разработаны проекты новых горелочных устройств с растянутым участком воспламенения факела для замены вихревых горелок, сжигающих твердое топливо разнородного состава и природный газ на котлах БКЗ-210-140Ф 2<sup>й</sup> очереди ЧТЭЦ-2 и газовых горелок на котлах ПК-33 ЮУГРЭС, что подтверждено актами использования результатов работы.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Осинцев, К.В.** Рассредоточение узлов ввода реагентов в топку как метод снижения выхода оксидов азота / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Проблемы теплоэнергетики: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. докл. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - С. 35-36.

2. **Осинцев, К.В.** Улучшение факельной технологии сжигания доменного, коксового и природного газов в топках с фронтальной компоновкой горелок на котлах ТЭЦ меткомбинатов / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 7<sup>й</sup> Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов: сб. докл. - Магнитогорск: Издательский центр ГОУ ВПО "МГТУ", 2006. - С. 173-175.

3. **Осинцев, К.В.** Повышение надежности сопловых узлов ввода реагентов в топку на котлах БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых: сб. докл. - Екатеринбург: ИД УралОрИздат, 2006. - С. 156.

4. **Осинцев, В.В.** Применение многофункциональных горелок в технологии факельного сжигания газа и пыли угля с различным составом и свойствами на котлах Челябинской ТЭЦ-2 / **В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев** // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб. докл. - Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. - Ч.2. - С. 142-150.

5. **Осинцев, В.В.** Утилизация углеродосодержащих отходов в полидисперсном и газовом факелах многофункциональных горелок / **В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев** // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб.

докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. - Ч.2. - С. 150-157.

6. Осинцев, В.В. Особенности термогазодинамики факельных топок с рассредоточенным вводом топливных и окислительных потоков / В.В. Осинцев, **К.В. Осинцев** // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. - Ч.2. - С. 135-142.

7. Улучшение процесса сжигания топлива на котлах БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, **К.В. Осинцев** // Электрические станции. - 2006. - №11. - С. 13-20.

8. **Осинцев, К.В.** Термогазодинамические особенности начального участка газового факела при рассредоточенном вводе реагентных потоков в топку через горелки / **К.В. Осинцев** // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева; сб. докл. - Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2007. - Том I. - С. 253-254.

9. Учет неоднородности и нестабильности тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / **К.В. Осинцев, В.В. Осинцев** // Теплоэнергетика. - 2007. - №6. - С. 66-70.

10. **Осинцев, К.В.** Учет термогазодинамических особенностей полидисперсного факела при проектировании топок / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник докладов IV научно-практической конференции: сб. докл. – Челябинск: Изд-во ООО “Тираж сервис”, 2007. - Том II. - С. 86-88.

11. Особенности и экологическое совершенствование факельных технологий сжигания газа на котлах тепловых электростанций / Е.В. Торопов, **К.В. Осинцев** // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. - 2007. - вып. 8 - №20 (92). - С. 10-12.

12. **Осинцев, К.В.** Термогазодинамические особенности начального участка факела при рассредоточенном вводе реагентных потоков в топку котельного агрегата / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Четырнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2008. - Т.2. - С. 342-343.

13. Перевод оборудования ТЭС на факельное сжигание разнородных топлив с использованием технологии рассредоточенного ввода реагентов в топку / **Осинцев К.В., Сухарев М.П., Торопов Е.В., Осинцев В.В.** // Теплоэнергетика. - 2008. - №4. - С. 75-79.

14. **Осинцев, К.В.** Повышение срока службы горелочных устройств на котлах средней мощности при факельном сжигании природного газа / **К.В. Осинцев, Е.В. Торопов** // Проблемы теплоэнергетики: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. докл. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. - С. 54-55.

15. Пат. 2303194 РФ, МПК<sup>51</sup>, С 1 F23C 5/28. Топка / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., **Осинцев К.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО

3

“Южно-Уральский государственный университет”. - №2006111936/06; заявл. 10.04.06; опубл. 20.07.2007, Бюл. №20. - 6 с.: 4 ил.

16. Пат. 2303193 РФ, МПК<sup>51</sup>, С 1 F23C 1/12. Способ ступенчатого сжигания газа в вертикальной призматической четырехгранной камере сгорания / Осинцев В.В., Полевин А.В., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., **Осинцев К.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”. - № 2006111952/06; заявл. 10.04.06; опубл. 20.07.2007, Бюл. №20. - 6 с.: 14 ил.

17. Пат. 2306484 РФ, МПК<sup>51</sup>, С 1 F23D 17/00, F23C 1/12. Способ работы многофункциональной горелки / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., **Осинцев К.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”. - №2006121067/06; заявл. 13.06.06; опубл. 20.09.2007, Бюл. №26. - 6 с.: 10 ил.

18. Пат. 2306482 РФ, МПК<sup>51</sup>, С 1 F23C 1/12, F23C 5/08. Горелочное устройство / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., **Осинцев К.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”. - № 2006121027/06; заявл. 13.06.06; опубл. 20.09.2007, Бюл. №26. - 6 с.: 4 ил.

19. Пат. 2309332 РФ, МПК<sup>51</sup>, С 1 F23D 17/00. Многофункциональная горелка / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., **Осинцев К.В.**; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”. - № 2006121028/06; заявл. 13.06.06; опубл. 27.10.2007, Бюл. №30. - 9 с.: 5 ил.

Формат 60x84 1/16. Бумага ВХИ 80 гр. Объем 1,5 усл. п. л.  
Тираж 100 экз. Заказ №1

Изготовлено в полном соответствии с качеством  
предоставленных оригиналов заказчиком  
в ООО «РЕКПОЛ», 454048, г. Челябинск, пр. Ленина, 77,  
тел.(351) 265-41-09, 265-49-84