

КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКЕЛЬНОГО СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА КОТЛАХ

К. В. Осинцев
г. Челябинск, ЮУрГУ

CLASSIFICATION AND ANALYSIS OF EFFICIENCY OF METHODS OF THE LOW-TEMPERATURE FLAME COMBUSTION OF THE COAL DUST ON COPPERS

K.V. Osintsev
Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрено техническое состояние горелочного парка ТЭС в начальный период освоения газофакельных технологий. Показаны методы и пути их совершенствования. Отражён вклад специалистов кафедры ПТЭ ЮУрГУ в развитие и освоение новых технологий.

Ключевые слова: низкотемпературное факельное сжигание, котельный агрегат, горелка.

The technical condition of burner park of the thermal power plant in an initial stage of gas torch technologies is considered. Methods and ways of their improvement are shown. The contribution of the experts of the Industrial Heat-and-Power Engineering Department of South Ural State University to development and new technologies learning is reflected.

Keywords: low-temperature flame combustion, copper unit, burner.

Взятый в теплоэнергетике курс на повышение единичной мощности основного, в том числе котельного, оборудования ТЭС инициировал в 20-30 гг. прошлого столетия появление и бурное развитие топочной технологии, основанной на процессе организованного взаимопоглощения пылеугольных и окислительных воздушных потоков с выделением теплоты и образованием излучающих высокоэнтальпийных продуктов сгорания. Процесс стали называть пламенным или факельным горением, ввод реагентных потоков осуществлять, через горелки, как правило, в нижнюю часть топки, а выделяемую теплоту отводить излучением настенным и встроенным трубным экраном и перемещаемой в них пароводяной среде [1].

Факельная технология сжигания угольной пыли имела много проблем. В процессе проектирования и наладки новых котлов приходилось улучшать как работу систем пылеприготовления, так и характеристики собственно топочного факела, подавлять активность шлакования экранов и ширм. Большое внимание уделялось устойчивости зажигания. Стремление разработчиков минимизи-

ровать вероятность срыва горения, вызвало повсеместное распространение горелочных конструкций смесительного типа [1,2]. Горелки данного типа имели различные конструкции, выполнялись как прямоточными с прямоугольным профилем, так и вихревыми осесимметричными. Котлы БКЗ-210-140Ф 1-й очереди Челябинской ТЭЦ-2 изначально также были оснащены горелками смесительного типа. Последние выполнены низкоскоростными (со средней скоростью выхлопа реагентов в топку $w_r \leq 2$ м/с). Они размещались на фронтальной стене топочной камеры и формировали факел однородной смеси с активным зажиганием вблизи амбразур, рис. 1, а. В качестве наглядного примера на рис. 2 представлено изменение параметров процесса горения однородной смеси на этих котлах при сжигании челябинского бурого угля. Подробное описание котлов, методика испытаний и характеристики топлива приведены ранее [3, 4, 5]. Из рис. 2 видно, что при реализации горения однородной смеси по кривым 1 внутри узкой области примыкания факела к горелке $l_{\text{ф}1}$ потребляется до 75 % окислителя $\bar{O}_2 = 1 - (O_2/21)$, выгорает до

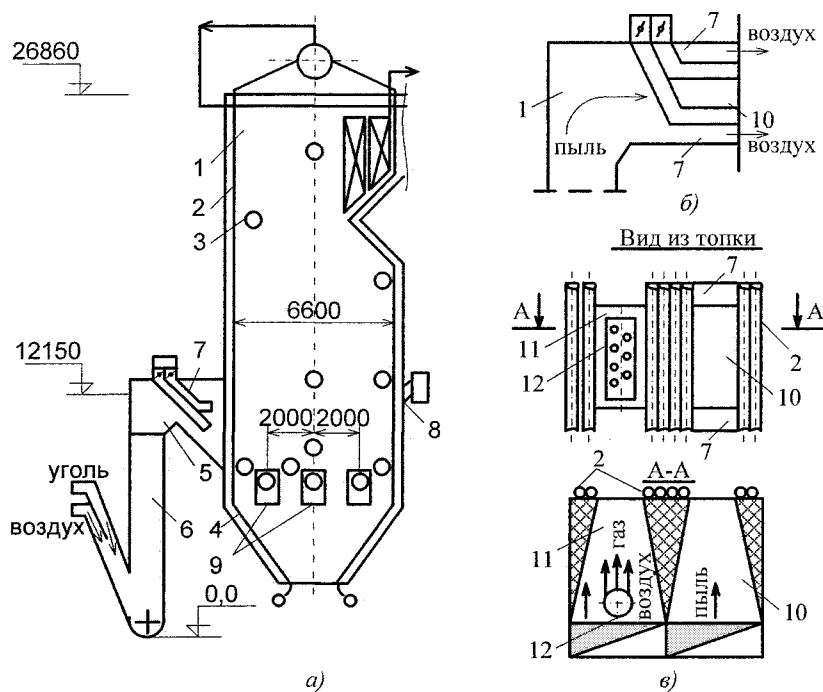


Рис. 1. Схемы топки и горелок котла БКЗ-210-140Ф: а - топка с заводскими низкоскоростными горелками смешительного типа; б - модернизированная высокоскоростная пылеугольная горелка смешительного типа; в - многофункциональная горелка; 1 - толка; 2 - экраны; 3 - люки; 4 - холодная воронка; 5 - заводские пылеугольные горелки смешительного типа; 6 - молотковые мельницы; 7 - воздушные сопла пылеугольных горелок; 8 - воздушные сопла на задних экранах; 9 - воздушные сопла газовых горелок; 10 - пылеугольные каналы горелок; 11 - воздушные каналы горелок; 12 - трубы с газовыпускными соплами

75 % топлива $a = 1 - q_3 - q_4$, образуется около 75 % газообразных продуктов сгорания $\bar{RO}_x = RO_x / RO_x^{\max}$ (здесь O_2 , RO_x - усредненные в поперечном сечении факела концентрации кислорода и продуктов сгорания, %; RO_x^{\max} - концентрация продуктов сгорания в выходном окне топки, %; q_3 , q_4 - потери теплоты с химическим и механическим недожогом топлива). С началом выделения теплоты количество продуктов сгорания нарастает вдоль траектории горелочного факела пропорционально расходованию окислителя и топлива.

Одновременно с прирастанием количества выделяющейся теплоты вдоль траектории движения реагирующих компонент увеличиваются значения энтальпии и температуры факела T . Максимальные значения последних смещены к границе рассматриваемой области изменения параметров на расстоянии $l_{\phi 1} \approx 0,5$ м от горелочных амбразур. Если изначально не предусмотрены какие-либо меры режимно-технологического характера, то и на других котлах, сжигающих уголь с высоким выходом летучих $V^x \geq 25$ % в горелках смешительного типа, это расстояние также не превышает $l_{\phi 1} \leq 0,5$ м [6, 7, 8]. Во всех случаях использования низкоскоростных горелок смешительного типа при высоком локальном тепловом напряжении ограниченного пространства вблизи горелок ζ развива-

ется высокий уровень температуры факела, при котором частицы топливной породы шлакующих топлив начинают плавиться и налипать на стены топочной камеры с экранами. Большие тепловые потоки в направлении амбразур вызывают активное терморазрушение горелочной обмуровки, каналов и узлов ввода потоков топлива и воздуха, а в отводимых продуктах сгорания высок уровень концентрации оксидов азота $NO_x \geq 650-800$ мг/м³ [6, 7, 8].

Для улучшения термодинамических характеристик горелок стали увеличивать скорость выхода реагентов из амбразур [2, 9, 10, 11]. Высокоскоростные горелки смешительного типа имеют более высокую степень надежности, нежели их низкоскоростные аналоги. Однако в отсутствии каких-либо дополнительных мер воздействия на тепловые характеристики факела в топке сохраняется высокий уровень температуры как в зоне активного горения, так и на выходе из топки. Попытки эксплуатации улучшить температурные условия амбразур прямоточных горелок путем заужения их выходного сечения и увеличения скорости выхода реагентных потоков в топку котла БКЗ-210-140Ф при сжигании челябинского угля привели к смещению исходного местоположения температурного максимума факела к центру, но без существенного изменения его значения, (рис. 1, б; рис. 2, кривые 2). По-прежнему продолжали шлаковаться экраны на задней стене топки, сохранилась высо-

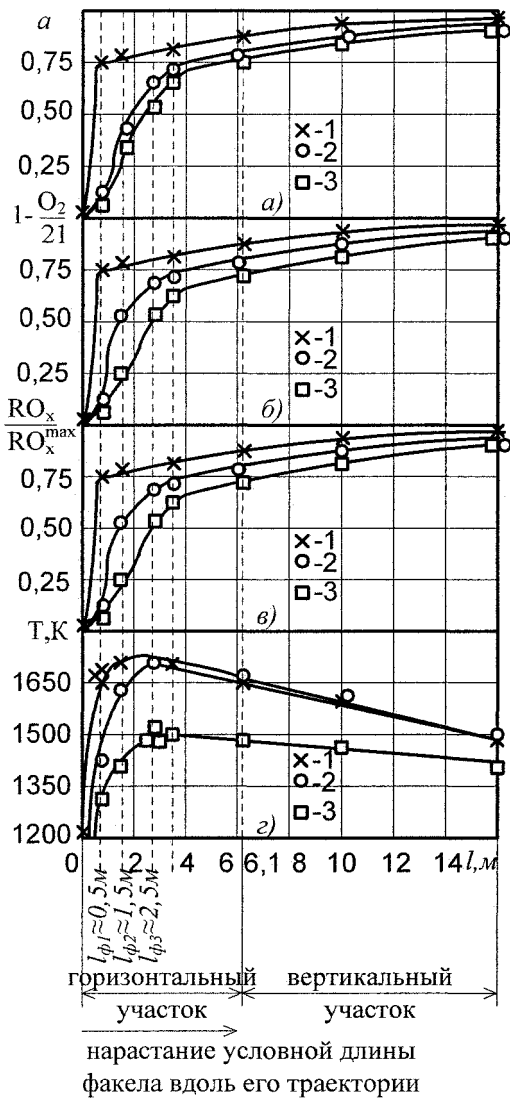


Рис. 2. Характер изменения параметров вдоль траектории пылеугольного факела в топке котла БКЗ-210-140Ф при сжигании челябинского бурого угля (паровая нагрузка $D_{пп}=170$ т/ч, коэффициент избытка воздуха за топкой $\alpha''_T=1,21-1,25$): а – степень выгорания топлива ($a=1-q_3-q_4$, где q_3, q_4 – тепловые потери с химическим и механическим недожогом топлива); б – степень потребления окислителя ($1-(O_2/21)$, где O_2 – текущее значение концентрации кислорода, %); в – степень роста газообразных продуктов сгорания (RO_x/RO_x^{max} , где RO_x, RO_x^{max} – текущее и в выходном окне топки значения концентрации оксидов углерода, %); г – температура факела (T, K); 1, 2 – с организацией внутренней подпитки факела окислителем через горелки по рис. 1 а, б; 3 – с организацией комбинированной подпитки факела через горелки по рис. 1, в

кая концентрация оксидов азота в продуктах сгорания.

Улучшение характеристик факельного процесса наблюдается при снижении температурного фона в области максимального тепловыделения и в выходном окне топочной камеры. Для достижения необходимого температурного уровня и концентрации образующихся вредных оксидов азота сегодня используют различные методы, которые можно свести к общей классификационной схеме, рис. 3. Как видно из схемы, главенствующими процедурами снижения температурного уровня в зоне активного горения топки, где размещены горелки, будут интенсификация теплоотвода и снижение скорости расходования реагентов (иначе, пассивирование топливного окисления и тепловыделения).

Для интенсификации теплоотвода увеличивают поверхности нагрева в объеме топки с факельной средой и воздействуют на характеристики самого факела. При реализации первого из упомя-

нутых методов топку дополняют новыми элементами: встроенными экранами и ширмами. Для установки новых элементов необходимы значительные разовые затраты, которые, конечно, оправданы для вновь устанавливаемого оборудования, но не на существующих ТЭС с невыработанным ресурсом котлоагрегатов [12].

Другой метод интенсификации теплоотвода связан с воздействием на факельные характеристики, в частности, температурные и скоростные поля, характер которых связан с компоновкой и загрузкой горелок топливом [13]. Максимальная активность теплоотвода при неизменной загрязненности экранов ($\Psi_3=const$) в топках одного типоразмера и при сжигании одного вида угля достигается при тангенциальной компоновке горелочных устройств на стенах топочной камеры, что связано с газодинамическим смещением факельной среды с температурным максимумом к периферии топочного объема и ее движением вдоль всех вертикальных стен [2]. В топках с фронталь-

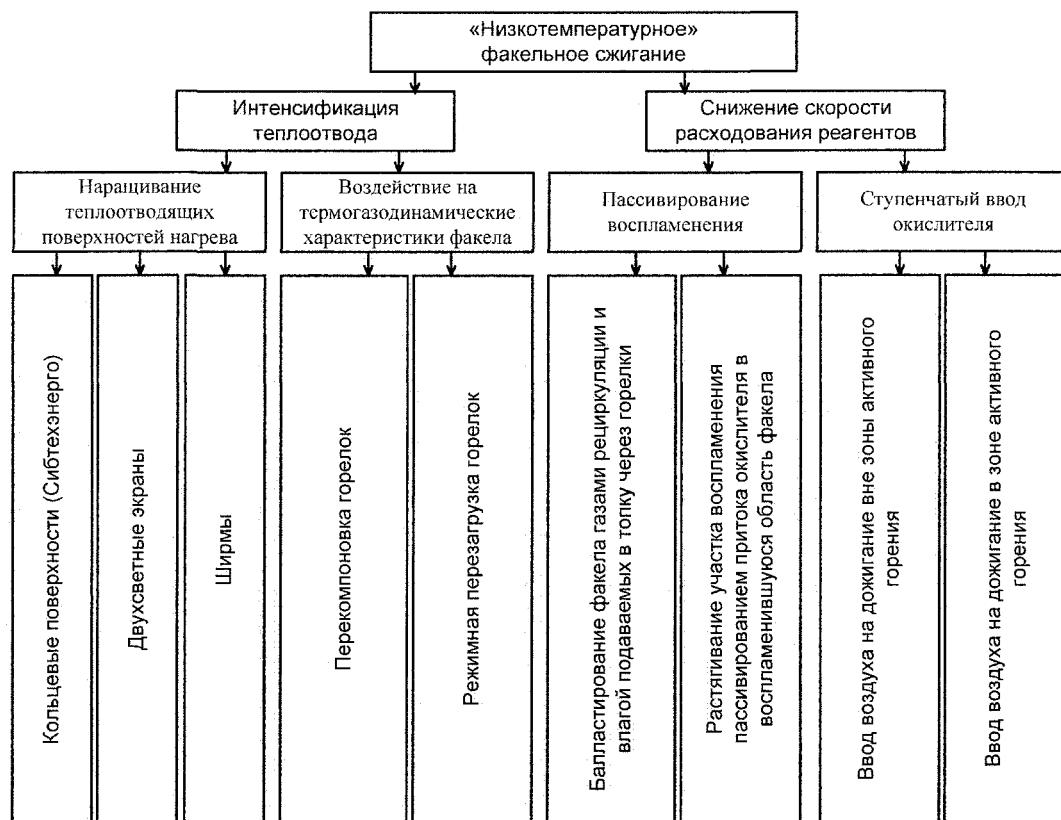
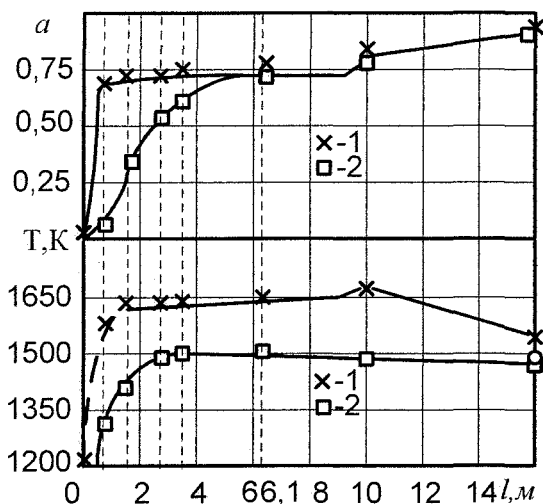


Рис. 3. Классификация методов организации низкотемпературного факельного сжигания топлива

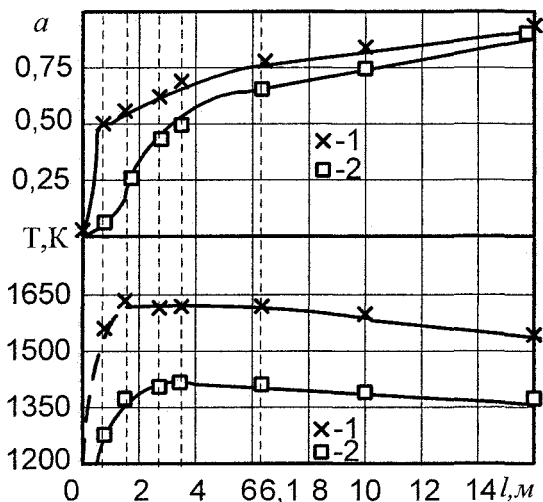
ной компоновкой горелок ярко выраженный максимум температуры факела смещен к задней стене [2, 13]. Эффективность теплообмена в такой топке по сравнению с топкой, оснащенной тангенциальными горелками, существенно ниже, а среднерасчетная и практическая температура в выходном окне оказывается выше до $\Delta T_{T1} = 120$ К и более.

Еще выше этот показатель для топки со встречной компоновкой горелок, где максимум температуры факела стремится занять место в центральной области топочного объема, здесь $\Delta T_{T2} = 150\text{--}200$ К. Для снижения среднего температурного уровня в выходном окне топок с фронтальной и встречной компоновкой горелок коллективом ЮУрГУ-УралВТИ-МЭИ был разработан метод, основанный на газодинамическом перераспределении тепловыделения в топке путем перекомпоновки и перезагрузки отдельных горелок с организацией движения потоков с максимальной температурой вдоль боковых стен [13]. При организации такой термогазодинамики топок параметры ΔT_{T1} и ΔT_{T2} уменьшаются вдвое. При конструировании имеет смысл корректировать значения проектного параметра «М» дополнительным поправочным коэффициентом, $M' = M \cdot K_T$, где $K_T \approx 1,05$. Метод газодинамического воздействия на факельные характеристики достаточно эффективен при снижении температуры факела в выходном окне, уменьшении концентрации оксидов азота в продуктах

сгорания, но он не регулирует температурные условия работы горелок, влияющие на их надежность. Для этой цели следует искать метод из другой ветви классификационной схемы, а именно, в снижении скорости расходования реагентов. Это мероприятие можно связать со ставшим на сегодня классическим ступенчатым (прерывистым) вводом окислителя в топку и пассивированием процесса воспламенения. При реализации классического метода ступенчатого ввода окислителя в топку большую часть воздуха вводят в горелки, меньшую - на дожигание вне зоны активного горения, обычно в верхнюю часть топки поперечными или тангенциальными струями. В качестве самостоятельного этот метод сжигания топлива практикуют главным образом для снижения концентрации оксидов азота. Способ был реализован на том же котле БКЗ-210-140Ф при сжигании челябинского бурого угля, позволил снизить концентрацию NO_x до 40 %. При работе котла по этому способу был проведен анализ горения. На рис. 4, а кривые 1 отражают изменение параметров на участке факельного воспламенения в топке с горелками смешительного типа по рис. 1, а при недостатке кислорода для полного сгорания топлива, $\alpha_T < 1,0$. Из рис. 4, а видно, что при реализации окислительного процесса с недостатком вводимого через горелки воздуха, активное расходование последнего происходит на участке с $l_\phi < l_{\phi 1}$, кривые 1. При этом степень выгорания топлива а, также как и



а)



б)

Рис. 4. Характер изменения степени выгорания топлива (а) и температуры (Т) вдоль траектории пылеугольного факела в топке котла БКЗ-210-140Ф при сжигании челябинского бурого угля (паровая нагрузка $D_{пп} = 170$ т/ч, коэффициент избытка воздуха за топкой $\alpha'_T = 1,21-1,25$): а – ступенчатое сжигание; б – ввод газов рециркуляции в мельницы ($O_2^{0\text{ пыли}} \approx 16\%$); 1 – с организацией внутренней подпитки факела окислителем через горелки по рис. 1, а; 2 – с организацией комбинированной подпитки факела окислителем через горелки по рис. 1, в

энтальпия $I_{\phi 1}$ и температура $T_{\phi 1}$ - ниже тех же показателей для варианта подачи реагентов через ту же горелку с коэффициентом избытка воздуха $\alpha'_T > 1$ на рис. 2. На отметке факельной траектории $l_{\text{дожиг}}$; где осуществляется ввод дожигающей порции воздуха, значения параметров факела выходят на уровень значений кривых 1 на рис. 2. В выходном окне топок меньших типоразмеров процесс дожига, как правило, не завершается, здесь увеличивается степень недожога и температура факела [10].

Известны методы сжигания топлива с подачей топливо - воздушных потоков через горелки, а дожигающих потоков окислителя через сопла, установленные на стенах топочных камер в зоне активного горения, поперечными, встречными, вихреобразующими струями [2, 8, 14]. При подобной организации сжигания шлакующего топлива снижается активность шлакования на экранах в зоне активного горения. На обследованных сотрудни-

ками кафедры промтеплоэнергетики ЮУрГУ котлах БКЗ-210-140Ф и ПК-14 с размещением дожигающих сопел на боковых экранах существенных изменений степени механического недожога d_4 не происходило, но усиливалось шлакование ширм из-за увеличения температуры продуктов сгорания в выходном окне топочной камеры T_T^{fl} , а также температура уходящих газов, и соответствующие потери теплоты q_2 . В связи с этим использование метода ограничено сжиганием газа и нешлакующего твердого топлива в основном для снижения активности образования NO_x [8]. Ввод дожигающих потоков в зону активного горения может быть реализовано по методу ЛПИ, разработанному для сжигания торфа и бурого угля. Реагентные потоки грубой пыли, вплоть до дробленки, и воздуха через наклоненные горелки направляют в сторону холодной воронки, где топливные частицы подхватываются вихреобразующими струями дожи-

гающего воздуха, истекающими из сопл, ориентированными в сторону устья горелочных устройств [14]. В сравнении с вариантом развития горизонтально истекающих реагентных потоков, сильно наклоненный на участке воспламенения факел формирует более активную циркуляционную вихревую ветвь обтекания холодной воронки, имеет пониженный уровень температуры как в зоне активного горения, так и в выходном окне топки. Ввод топлива с большим содержанием крупных фракций дает увеличенные потери теплоты с механическим недожогом топлива q_r .

Существенно выигрывает метод организации замедленного расходования реагентов на участке воспламенения, разработанный на кафедре промышленной теплоэнергетики ЮУрГУ. При реализации метода осуществляется «растягивание» участка воспламенения на величину Δl_{ϕ} с организацией зажигания на отрезке $l_{\phi 2} = l_{\phi 2} + \Delta l_{\phi}$ (см. рис. 2). Теперь расходование реагентов (O_2 , a) и образование газообразных продуктов сгорания ($\bar{R}O_x$) протекает не столь активно, по кривым 3 на рис. 2. С приростом количества выделяющейся теплоты вдоль траектории движения горелочного факела также происходит увеличение энтальпии и температуры факела. Однако значения этих параметров при рассредоточении выделяющейся в большом объеме $v_2 > v_1$ теплоты по кривым 3 становятся ниже значений тех же параметров в исходном варианте по кривым 1 (см. рис. 2). На котлах БКЗ-210-140Ф с модернизированными для реализации необходимого эффекта пылеугольными горелками (по патентной версии многофункциональные горелочные устройства) по рис. 1, *в* достигается увеличение линейного размера зажигания $l_{\phi 2} = 1,5-2,5$ м. Эти горелки обеспечивают непрерывное плавное дозирование окислителя, реализуя сложный комбинированный механизм доставки последнего к топливному реагенту с первоначальным воспламенением однородной топливо-воздушной смеси при недостатке кислорода (внутреннее питание окислителем), и последующей диффузионно-приточной подпиткой факела вторичным воздухом. В сравнении с вариантом факельного воспламенения реагентной смеси, истекающей из горелок смесительного типа по рис. 1, *а, б*, здесь отмечается снижение уровня максимальной температуры факела (до $\Delta T_{\phi} = 100-150$ К), снижение падающих тепловых потоков в направлении амбразур с улучшением тепловых условий их работы и продлением срока их службы. Кроме того, существенно снижается и выход оксидов азота до $NO_x = 390-450$ мг/нм³.

Топливное окисление с недостатком окислителя в модернизированных горелках по рис. 1, *в* с последующим вводом остатка через вынесенные сопла реализуется по тому же сценарию, что и при использовании обычных горелок по рис. 1, *а*. Кривые 3 на рис. 4, *а* соответствуют кривым при обед-

нении кислородом горелочного потока. Практически не изменяется характер кривых степени выгорания топлива a , но по достижении отметки $l_{\text{дожиг}}$ после присадки порции окислителя через сопла, компенсирующего изначальную его нехватку в горелках, можно наблюдать скачок активности выгорания угольной пыли. При этом температурный уровень факела и концентрация NO_x остаются пониженными. Понятно, что присадка дожигающего воздуха через вынесенные сопла имеет смысл для случая $l_{\text{дожиг}} < l_{\text{аг}}$, то есть на участке воспламенения и активного горения собственно горелочного факела. В противном случае, как и в случае горения однородной смеси по кривым 1 рис. 4, *а*, произойдет затягивание процесса с увеличением температуры факела на выходе из топки T''_T и снижением степени выгорания a .

При вводе газов рециркуляции через горелки в топку в качестве балласта, пассивирующего процесс топливного окисления на участке воспламенения, также подавляются высокие очаги температуры, кривые 1, 2 на рис. 4, *б*. Пассивируя воспламенительный процесс, газы рециркуляции снижают активность выхода оксидов азота, но увеличивают тепловые потери с уходящими газами, а также затраты собственных нужд котла. Это касается использования как горелок смесительного типа по рис. 1, *а*, так и модернизированных горелок по рис. 1, *в*.

Выводы

1. Низкотемпературное сжигание угольной пыли в топочных камерах является эффективным мероприятием повышения надежности оборудования, снижения выхода оксидов азота, уменьшения активности шлакования при сжигании шлакующего твердого топлива.

2. Многообразие методов организации низкотемпературного сжигания топлива в топках современных котлов можно свести к двум основным воздействиям на топочный процесс: интенсификации теплоотвода и снижению скорости расходования окислителя.

3. Среди наиболее эффективных методов интенсификации теплоотвода можно выделить наращивание поверхностей нагрева в топке.

4. Сопоставимым по эффективности с наращиванием поверхностей нагрева является метод растягивания участка воспламенения пассивированием притока окислителя.

5. К преимуществам метода по п. 4 можно отнести его малозатратность, доступность применения на существующих котлах. При использовании этого метода наряду с реализацией преимуществ низкотемпературного сжигания топлива по п. 1 достигается снижение тепловых потоков в направлении горелочных амбразур, существенное увеличение срока службы обмуровки и металлоконструкций горелок.

Литература

1. Котельные установки / К.Ф. Роддатис, Э.И. Ромм, Н.А. Семенов и др. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946. - Том II. - 708 с.
2. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. — М.: Энергия, 1976. - 488 с.
3. Анализ эффективности сжигания природного газа и бурого угля ухудшенного качества на котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. — 2001. — № 6. — С. 26-34.
4. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. - 2002. — №11. -С 14-19.
5. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с одноярусной фронтальной компоновкой многофункциональных горелок при сжигании разнородного топлива / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, КВ. Осинцев // Теплоэнергетика. - 2005. -№9.- С. 14-23.
6. Улучшение процесса сжигания топлива на котлах БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, КВ. Осинцев // Электрические станции. -2006. -№11. С. 13-19.
7. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / КВ. Осинцев // Электрические станции. -2009. —№11.—С. 13—17.
8. Сжигание пыли челябинского угля на котле ПК-14 в условиях одноступенчатого и многоступенчатого ввода воздуха в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов // Известия вузов. Энергетика. - 1992. -№2.- С. 78-84.
9. К вопросу повышения эффективности работы пылеугольных плоскофакельных горелок / В.И. Черняев, В.А. Двойнишников и др. // Теплоэнергетика. -1990. -№4.-С. 17-19.
10. Проектирование топков с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания // под ред. В.В. Митора, Ю.Л. Маршак. - Л.: ВТИ - НПО ЦКТИ, 1981. - Вып. 42.-118 с.
11. Освоение головных и опытно-промышленных котельных установок при сжигании углей сибирских месторождений / Л.И. Пугач, Ф.А. Серант, А.Н. Волобуев и др. // Электрические станции. - 1996. -№ 11. - С. 3-13.
12. Результаты освоения опытно-промышленного котла производительностью 820 т/ч с кольцевой топкой при сжигании азейских и иршабординских углей / Ф.А. Серант, О.И. Будилов, В.Е. Остапенко, В.П. Сенов // Теплоэнергетика. — 2003.-№8.-С. 2-10.
13. Совершенствование методов снижения температурных неравномерностей в топках с фронтальной компоновкой горелок / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов и др. // Теплоэнергетика. -1990. -№4.- С. 23-26.
14. Освоение и исследование котла БКЗ-420-140-9 с вихревой топкой ЛПИ / Ю.А. Рундыгин, СМ. Шестаков, ДБ. Ахметов и др. // Теплоэнергетика. -1988. -№1.- С. 12-16.
15. Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канско-ачинских углей / М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак, М.С. Пронин и др. // Теплоэнергетика. - 1988. -№1.- С. 5-12.

Поступила в редакцию 2.06.2010 г.

Осинцев Константин Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов - факельное сжигание. Контактный телефон: 8-(351) 267-93-95.

Konstantin Vladimirovich Osintsev is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Heat-and-Power Engineering Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: flame combustion. Contact phone: 8-(351)267-93-95.