

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЧНОГО ФАКЕЛА ПРИ СЖИГАНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГАЗОВ

К.В. Осинцев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Представлена методика теплового расчета топочных устройств котлов ТЭЦ-ПВС, сжигающих природный и промышленные газы, при встречном и тангенциальном вводе реагентов. Показано, что при проведении проектно-конструкторских работ, наладке и исследованиях промышленных котлов использование модели и методики расчета упрощает переход к современным системам сжигания топлива со снижением эмиссии оксидов азота, повышением надежности теплонепригодных элементов котельного оборудования, повышением эффективности работы тепломеханического оборудования ТЭЦ-ПВС. Отмечено, что предложенные модель и расчетная методика могут быть использованы в качестве базы для перехода к иным конструкциям топки, горелок и системам ввода топливных реагентов, а также другим видам промышленных газов.

Ключевые слова: энергетическое оборудование, котельные агрегаты, коксовый и доменный газы, методика расчета.

Введение

Эксплуатацию котлов, сжигающих природный и получаемые при переработке руды и угля промышленные доменный, коксовый и генераторный газы, осуществляют при обязательном контроле и регулировании температурных характеристик топочного факела, в том числе, формируемого в нем уровня неравномерности [1–4]. Отклонения максимальной температуры от среднего значения в выходном окне топочной камеры могут достигать 100–150 К, а в поперечных сечениях зоны активного горения 150–250 К [1–18]. В областях с максимальными температурами факела активизируются процессы высокотемпературной коррозии и перегревов труб экранов и пароперегревателей [19]. Максимумы температуры при этом могут менять свое местоположение в сечениях топки. Еще в 70-х годах прошлого столетия специалисты стали выявлять и фиксировать связь местоположения максимумов скорости и температуры со схемами компоновки и включения горелок [5–8]. Однако существующие методики тепловых расчетов учитывают лишь гипотетическое местоположение максимума температуры факела в центре топочных камер, и, специалисты, ориентируясь на него, продолжают разрабатывать и внедрять технологии по минимизации уровня этого максимума с вводом газов рециркуляции, установкой дополнительных ширм и другое [20–22].

Постановка задачи

В отсутствие должного учета температурной неравномерности тепловые расчеты производят с существенной погрешностью: отклонения средней температуры факела от реальных значений в промышленных котлах могут достигать 7 % и более. При этом усложняются пусковая наладка и испытания основного котельного оборудования, увеличиваются объемы работ по переводу котлов на

современные технологии сжигания топлива с пониженной эмиссией оксидов азота NO_x , а также по внедрению иных мероприятий.

Для повышения точности оценки температурных характеристик факела и эффективности управления ими ранее были предложены скорректированная теплофизическая модель и методика расчета топочного устройства промышленного котла с зонами активного горения и охлаждения дымовых газов [8, 9]. Они изначально были привязаны к однорядной компоновке горелок на фронтальной стене топки с твердым шлакоудалением и дополняла основной нормативный расчет суммарного теплообмена в топке. Основное предназначение модели и методики – перевод промышленных котлов, работающих на буром угле ухудшенного качества и природном газе, на новые технологии топливного сжигания при пониженной эмиссии оксидов азота и одновременном повышении надежности и эффективности топочного оборудования. При переходе к сжиганию других топлив и топкам иных конструкций необходима их доработка.

Модель и методика расчета

Предлагаемые модель и методика расчета газофакельных параметров касаются промышленных котлов, где изначально сжигалась угольная пыль и организовано твердое шлакоудаление. Впоследствии топки перенастроены на комбинированное сжигание промышленного и природного газов [9–16]. Модель и методика отражают различные направления организации способов ввода и зажигания реагентных потоков и учитывают связанные с ними характеристики температурной неравномерности. Модель выглядит следующим образом.

1. Рабочий объем топки, как и в нормативных рекомендациях, и упомянутом выше аналоге, разделен на последовательные зоны активного горения и охлаждения, рис. 1 [9, 16, 20–22].

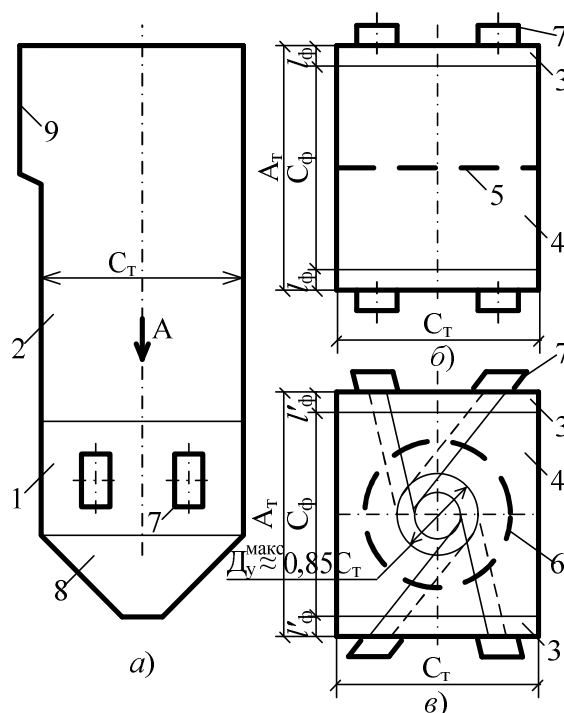


Рис. 1. Схема выделения основных зон и дополнительных участков: а – выделение основных зон; б, в – выделение дополнительных участков в зоне активного горения при встречной и тангенциальной компоновке горелок на боковых стенах, вид А; 1, 2 – зоны активного горения и охлаждения продуктов сгорания; 3, 4 – дополнительные участки воспламенения и горения при постоянной температуре с уравновешенным тепловыделением и теплоотводом; 5, 6 – условные расчетные плоскость и окружность развития максимумов температуры; 7, 8, 9 – горелки, холодная воронка и выходное окно топки

2. Зона активного горения включает нижнюю часть топочной камеры с горелками от холодной воронки до сечения над горелками.

2.1. Отметка нижней границы соответствует горизонтальной плоскости, ограничивающей холодную воронку сверху, отстоит от нижних образующих горелок нижнего яруса на $H_n \leq 2$ м [20].

2.2. Верхняя граница зоны активного горения размещается на $H_v \sim 1,5$ м выше верхних образующих амбразур горелок верхнего яруса [20].

2.3. Горелки – стандартные прямооточные смесительного типа, плоскофакельные и с узлами соплового рассредоточенного ввода реагентных потоков в топку (по патентной версии «многофункциональные горелочные устройства»). Конструкционные и связанные с ними режимные расходно-скоростные характеристики смесительных и плоскофакельных горелок определяются методическими материалами [20–22]. Параметры многофункциональных горелок выбираются с учетом накапливаемого опыта и рекомендаций [12–18].

2.4. Компоновка горелок на стенах ограничена исследованными фронтальной, встречной и тангенциальной схемами по рис. 1, 2.

3. Зона охлаждения включает верхнюю часть

топочной камеры над зоной активного горения с потолочным перекрытием и примыкающим к нему боковым окном при П-образной компоновке топки с газоходами, рис. 1, либо двумя симметрично размещенными окнами при Т-образной компоновке топки с газоходами. На стенах зоны охлаждения могут размещаться сопла системы дожигаания, либо газов рециркуляции.

4. Зона активного горения в направлении движения факелов из горелок дополнительно делится на последовательные участки воспламенения, где происходит нарастание температурного уровня факела, и горения при условно постоянных усредненных температуре $T_{ф0}$ и энтальпии $I_{ф0}$ топочной среды (газопылекоксовоздушной смеси), рис. 1, 2.

5. Выделенные зоны и участки ограничены поверхностями и объемами со следующими внутри-топочными размерами.

5.1. Размеры основных зон, в том числе их высота $H_{аг}$ и $H_{охл}$, м, а также межгорелочные расстояния и количество ярусов горелок определяют согласно методическим указаниям с традиционной проверкой и привязкой по теплонапряженности $q_{аг}$ сечений топочных камер [20–22].

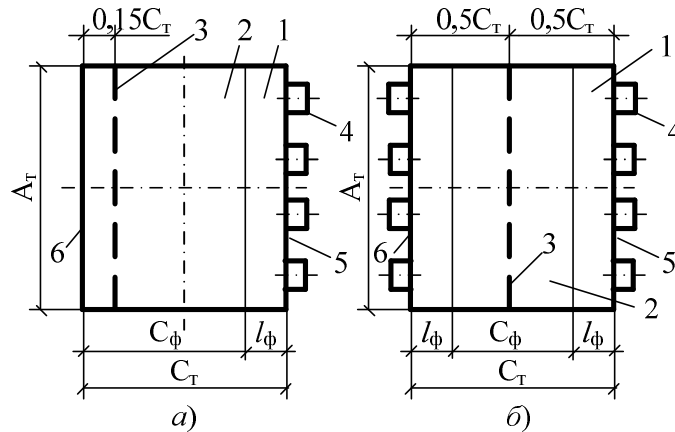


Рис. 2. Схема выделения дополнительных участков: а – размещение горелок на фронтальной стене; б – то же на фронтальной и задней стенах; 1, 2 – участки воспламенения и горения при постоянной температуре с уравновешенным тепловыделением и теплоотводом; 3 – условная расчетная плоскость развития максимумов температуры; 4 – горелки; 5, 6 – фронтальная и задняя стены топки

5.2. Дополнительно выделяют площадь поперечного сечения F_B , m^2 и длину l_Φ , м горизонтального участка факельного воспламенения (участка с пониженным уровнем температуры); параметр l_Φ соответствует расстоянию от экранов с амбразурами горелок до участка горения с условно постоянной температурой $T_{\Phi 0}$, рис. 1, 2.

5.3. Площадь поперечного сечения горизонтального участка горения с условно постоянной температурой определяют как $F_\Phi = F_T - F_B$, m^2 , рис. 1, 2. Длина этого участка для топок с фронтальной компоновкой горелок $C_\Phi = C_T - l_\Phi$, для топок со встречной компоновкой горелок $C_\Phi = C_T - 2l_\Phi$, или $C_\Phi = A_T - 2l_\Phi$, где $\Psi_3^{a.g} = \varphi_1(T_{a.g}^{cp})$, A_T – соответственно глубина и ширина топки, м, рис. 1, а, б. Для разработанных схем тангенциального ввода реагентных потоков в топку с двух противоположных стен можно сохранить аналоговую запись $C_\Phi = A_T - 2l'_\Phi$, м, где $l'_\Phi \approx 0,5l_\Phi$.

6. В выделенных зонах и участках топочных камер протекают тепловые процессы со следующими особенностями.

6.1. На участке факельного воспламенения длиной l_Φ под влиянием нарастающего и значительно превышающего теплоотвод тепловыделения в направлении выхода реагентных потоков и движения факела происходит повышение усредненной в поперечном направлении температуры факела от $T = T_0$, К вблизи экранов с горелками (средней между температурой эжектируемой к экранам топочной среды и температурой реагентов, выходящих из амбразур горелок) до значения

$T = T_{\Phi 0}$, К, на втором участке зоны активного горения. Это повышение может быть описано универсальной зависимостью [9, 16]:

$$\Delta \bar{T} = (T - T_0) / (T_{\Phi 0} - T_0) = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где $\xi = l/l_\Phi$ – безразмерная длина факела, причем $\xi = 0$ на длине $l = 0$, а $\xi = 1,0$ на длине $l = l_\Phi$. Параметр m зависит от рода сжигаемого топлива, а также конструктивных и режимных особенностей горелок. Его значения, полученные при обработке данных исследований на промышленных котлах, приведены в таблице. Там же приведены данные по T_0 . Параметры l_Φ и T_0 связаны с конструкцией горелок.

В смесительных и плоскофакельных горелках с эжекцией топочных газов к амбразурам, горение начинается в амбразурах, здесь, как правило, при сжигании природного газа $l_\Phi \leq 0,25$ м, а $T_0 \geq 900$ К. При сжигании газа с инертным балластом (промышленного, газогенераторного) параметры $l_\Phi \leq 0,75$ м, а $T_0 \approx 900$ К. При работе многофункциональных горелок с узлами рассредоточенного ввода реагентов в топку $l_\Phi = 1,5-2,5$ м, а $T_0 \approx 800$ К.

6.2. Средний уровень температуры факела на участке воспламенения:

$$T_{\text{воспл}}^{\text{cp}} = \frac{1}{\xi_2 - \xi_1} \times \int_{\xi_1}^{\xi_2} \left(T_0 + (T_\Phi - T_0) (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{\frac{1}{m}} \right) d\xi. \quad (2)$$

Значения $T_{\text{воспл}}^{\text{cp}}$ приведены в таблице.

Характеристики участков воспламенения в рассматриваемых топках для различных типов горелок и видов топлива

№	Используемое топливо	Конструкция горелок	Расчетные характеристики участка воспламенения				
			l_{ϕ} , м	T_0 , К	$T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$, К	m	n
1	Природный газ	Смесительные	$\leq 0,25$	> 900	$0,945T_{\phi}$	5,50	4,00
2	Доменный газ	Плоскофакельные	$\leq 0,75$	~ 900	$0,910T_{\phi}$	5,25	3,75
3	Смесь доменного и природного газов (10–40 %), генераторный газ	Смесительные, плоскофакельные	$\leq 0,50$	~ 900	$0,925T_{\phi}$	5,00	3,50
4	Природный газ, доменный газ, смесь природного и доменного газов, коксовый газ, смесь коксового и доменного газов	Многофункциональные	1,50–2,50	~ 800	$0,875T_{\phi}$	4,50	3,25
5	Коксовый газ	Смесительные, плоскофакельные	$\leq 0,50$	~ 900	$0,925T_{\phi}$	5,00	3,50

6.3. На участках факельного воспламенения степень выгорания топлива нарастает от $a = 0$ на длине $l = 0$ до $a = a_{\phi}$ с $l = l_{\phi}$ и $T = T_{\phi 0}$. В безразмерном виде [9, 16]:

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

Значения параметра n приведены в таблице.

6.4. На участке горения с условно постоянной температурой выгорает основная масса топлива (степень выгорания $a_{\text{а.г}}'' = 0,95$ при сжигании природного и $a_{\text{а.г}}'' \approx 0,95$ при сжигании доменного газов), а также формируется тепловая неравномерность факела, характер которой зависит от схем компоновки и включения горелок [1, 5–8].

6.5. В зоне охлаждения происходит догорание топливного остатка и охлаждение экранами продуктов сгорания до средней температуры $T_{\text{т}}''^{\text{ср}}$ в выходном окне топки, а также выравнивание динамических и температурных полей путем турбулентного перемешивания соседних слоев факельной среды и ее расточки в объеме топки с заполнением поперечных сечений [1, 5–8].

6.6. При развороте факела на выходе из зоны охлаждения скоростные и температурные поля деформируются со смещением местоположения максимума температуры в выходных окнах топочных камер [6].

Методические рекомендации

Для проведения оценочных предварительных тепловых расчетов и обработки результатов исследований факельных процессов с использованием рассмотренной выше модели топочного устройства разработаны следующие методические рекомендации.

1. В тепловых расчетах используют средние значения температуры факела на выходе из зоны активного горения и в выходном окне топки $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}}$ и $T_{\text{т}}''^{\text{ср}}$ и степени выгорания топлива в тех же се-

чениях $a_{\text{а.г}}''$ и $a_{\text{т}}''$. Для оценки термической надежности и работоспособности топочных экранов и горелок, а также пароперегревательных поверхностей нагрева определяют локальные значения $T_{\phi 0}^{\text{min}}$, $T_{\phi 0}^{\text{max}}$ и $T_{\text{т}}''^{\text{max}}$.

2. Параметр $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}}$ определяется как средневзвешенный на двух участках факельного воспламенения и горения при постоянной температуре с уравновешенным теплоотводом и тепловыделением.

Для фронтальной компоновки горелок, размещаемых на фронтальной и задней стенах:

$$T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{воспл}}^{\text{ср}} l_{\phi} + T_{\phi 0} (C_{\text{т}} - l_{\phi})}{C_{\text{т}}}. \quad (4)$$

Для топок котлов со смесительными и плоскофакельными горелками $l_{\phi} \leq 0,5$ м, параметр $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} \approx 0,995T_{\phi 0}$; при использовании многофункциональных горелок $l_{\phi} = 1,5 - 2,5$ м, $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} \approx (0,94 - 0,97)T_{\phi 0}$.

Для встречной компоновки горелок, размещаемых на фронтальной и задней стенах:

$$T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{воспл}}^{\text{ср}} 2l_{\phi} + T_{\phi 0} (C_{\text{т}} - 2l_{\phi})}{C_{\text{т}}}. \quad (5)$$

То же с размещением горелок на боковых стенах:

$$T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{воспл}}^{\text{ср}} 2l_{\phi} + T_{\phi 0} (A_{\text{т}} - 2l_{\phi})}{A_{\text{т}}}. \quad (6)$$

Для топок котлов со смесительными и плоскофакельными горелками $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} \approx (0,990 - 0,995)T_{\phi 0}$; при использовании многофункциональных горелок $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} \approx (0,91 - 0,96)T_{\phi 0}$.

Для тангенциальной компоновки горелок в общем случае:

$$T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{воспл}}^{\text{ср}} (F_{\text{т}} - F_{\phi}) + T_{\phi 0} F_{\phi}}{F_{\text{т}}}. \quad (7)$$

При использовании схем ввода реагентов с боковых стен (рис. 1, а, в) сохраняется аналоговая запись $T_{а.г}^{н.ср}$ по формуле (5) с заменой параметра l_{ϕ} на $l'_{\phi} \approx 0,5l_{\phi}$; при $l_{\phi} \approx 2,5$ м значения параметра $T_{а.г}^{н.ср} \approx (0,95 - 0,97)T_{\phi 0}$. Снижение параметра l_{ϕ} до принимаемого в расчете l'_{ϕ} связано с наличием радиально-тангенциальных составляющих скорости топливовоздушных потоков, истекающих из горелок на участке воспламенения.

3. Анализ эффективности работы горелок и экранных поверхностей нагрева и термостойкости горелок проводится с учетом поправки на неравномерность распределения температуры в поперечных сечениях топки:

$$T_{\phi 0}^{\max} = k_1 T_{\phi 0}, \quad (8)$$

где $k_1 > 1,0$ – коэффициент неравномерности, определяется по результатам термогазодинамических продувок, в частности, для исследованного типа топок, они могут быть заимствованы из литературы [1, 5–8].

При анализе параметр $T_{\phi 0}^{\max}$ сравнивают с допустимым значением $T_{а.г}^{н.г}$. При $T_{\phi 0}^{\max} \leq T_{а.г}^{н.г}$ должна обеспечиваться безаварийная долгосрочная работа экранов. При $T_{\phi 0}^{\max} > T_{а.г}^{н.г}$ необходимо предусматривать меры снижения $T_{\phi 0}^{\max}$, в частности, осуществлять перезагрузку горелок реагентами, подавать газы рециркуляции, вводить ограничение по нагрузке, другое [20–22]. В качестве допустимой принимается температура $T_{а.г}^{н.г}$, определяющая тепловой поток $q_{\text{пад}} = f[(T_{а.г}^{н.г})^4]$ при нарушении работоспособности экранов [20–22].

4. Средняя температура факела на выходе из зоны охлаждения (или на выходе из топки) $T_{т}^{н.ср}$ определяется согласно методическим рекомендациям [20–22].

5. Анализ работы пароперегревателя со стороны набегающего факела на загрязняемость проводится с учетом поправки на неравномерность распределения температуры по ширине и высоте выходного окна топки:

$$T_{т}^{\max} = k_2 k_3 T_{т}^{н.ср}, \quad (9)$$

где k_2 – коэффициент неравномерности по ширине топки и выходного окна; k_3 – коэффициент неравномерности по высоте выходного окна. Для исследованного типа топок используют максимальное $k_2 \approx 1,05$ и табулированные значения k_3 [6]. Для других типов топочных камер и схем компоновки горелок и газоходов в отсутствии опытных данных $k_3 \approx 1,0$.

При анализе параметр $T_{т}^{\max}$ сравнивают с до-

пустимым значением $T_{т}^{н.г}$. При $T_{т}^{\max} \leq T_{т}^{н.г}$ обеспечивается безаварийная работа пароперегревателя во всех режимах эксплуатации. При $T_{т}^{\max} > T_{т}^{н.г}$ необходимо предусматривать меры снижения $T_{т}^{\max}$, в частности, осуществлять перезагрузку горелок реагентами, изменять угол их наклона, вводить газы рециркуляции в верхнюю часть зоны охлаждения топки. В последнем случае для снижения энергозатрат на собственные нужды по перекачке хладагента и уменьшения дополнительных потерь теплоты с уходящими газами (возникающих при изменении характера конвективного теплообмена) расход газов рециркуляции минимизируют, вводя их только в область с опасным максимумом $T_{т}^{\max}$ в зоне охлаждения по технологии УралВТИ–МЭИ–ЮУрГУ [7]. В качестве допустимой принимается температура $T_{т}^{н.г}$, определяющая падающий тепловой поток $q_{\text{пад}} = \varphi[(T_{т}^{н.г})^4]$ при нарушении работоспособности труб пароперегревателей [20–22].

6. Экспериментальные коэффициенты k_1, k_2, k_3 целесообразно использовать в расчетах тепловосприятия экранов и пароперегревателя [20, 21]. В отсутствие иных опытных данных оценку максимальных удельных тепловосприятий радиационных настенных экранов и ширмовых пароперегревателей в выходном окне топочной камеры следует производить согласно рекомендациям [20, 21].

7. В расчетах теплообмена в качестве степени выгорания топлива в выходном окне зоны активного горения необходимо принимать параметр a''_{ϕ} в конце участка горения с условно постоянной температурой факела $T_{\phi 0}$. В оценочных расчетах в отсутствие опытных данных $a''_{\phi} \approx a''_{а.г}$, $a''_{т} \approx a''_{т}$, выбираются согласно нормативной и методической документации [20–22].

8. При проведении исследований в отсутствие прямых замеров радиационных потоков теплоты оценку коэффициента эффективности экранов $\Psi_{\phi}^{а.г} = \varphi_1(T_{а.г}^{н.ср})$ в зоне активного горения и $\Psi_{\phi}^{охл} = \varphi_2(T_{т}^{н.ср})$ в зоне охлаждения можно производить расчетом, ориентируясь на опытные значения средней температуры $T_{а.г}^{н.ср} = f(T_{\phi 0})$ и $T_{т}^{н.ср} = \varphi_3(T_{а.г}^{н.ср}, T_{т}^{н.ср})$ соответственно согласно рекомендациям [20–22].

9. В отсутствие опытных данных оценку параметра $T_{\phi 0}$ можно произвести с использованием стационарной модели теплового равновесия Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого для элементарного линейного участка воспламенения газового

пламени с границами $l - (l + dl)$ [23]. Тепловой баланс с учетом реальных условий зажигания реагентной смеси выглядит следующим образом [9, 16]:

$$dq_T = dq_B(T) + dq_{\text{доп}} - dq_{\text{экр}} - dq_p - dq_{\text{гр}}, \quad (10)$$

где dq_T – тепловой поток в направлении поступления реагентной смеси, кВт, образующийся при наличии продольного температурного градиента $(T_{\text{ф0}} - T_0)/l$, К/м; $dq_B(T)$ – тепловыделение, кВт, генерирующее продольный температурный градиент $(T_{\text{ф0}} - T_0)/l$, К/м; dq_n – теплота, необходимая для нагрева смеси; $dq_{\text{доп}}$ – приток теплоты с подсветочным топливом, кВт; $dq_{\text{экр}}$ – отвод теплоты к экранам, кВт; dq_p – затраты теплоты на нагрев непрореагировавшей части топлива и воздуха, кВт; $dq_{\text{гр}}$ – потери теплоты факела на нагрев газов рециркуляции, кВт.

После раскрытия и интегрирования всех членов уравнение (10) можно представить в удобной для инженерных расчетов форме:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{T_{\text{ф0}} - T_0}{l_{\text{ф}}} F_{\text{ф}} &= a_{\text{ф}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} B_{\text{р}} + Q_{\text{н доп}}^{\text{р}} B_{\text{р доп}} - \\ &- \sigma a_{\text{т}} T_{\text{ф0}}^4 \sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i F_i)_{\text{а.г}} - c_{\text{рт}} (T_{\text{ф0}} - T_0) (1 - a_{\text{ф}}) B_{\text{р}} - \\ &- c_{\text{рв}} (T_{\text{ф0}} - T_0) \rho_0 \nu_0 \left[(1 - a_{\text{ф}}) + (\alpha - 1) \right] B_{\text{р}} - \\ &- c_{\text{рг}} (T_{\text{ф0}} - T_0) \rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}} r B_{\text{р}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где λ – условный коэффициент теплопроводности, кВт/(м·К), в проводимых исследованиях принимались опытные значения $\lambda \approx 1$ кВт/(м·К); T_0 – температура начальная, усредненная вдоль плоскости амбразур и поверхности экранов, в отсутствии опытных данных ориентировочно по приведенной выше таблице; $T_{\text{ф0}}$ – средняя температура факела смеси всех компонент в конце зоны воспламенения и условно постоянная на втором участке зоны активного горения, К; для топки с фронтальной компоновкой горелок $F_{\text{ф}} = H_{\text{а.г}} A_{\text{т}}$, м²; для топки со встречной компоновкой горелок $F_{\text{ф}} = H_{\text{а.г}} C_{\text{т}}$, м², где $H_{\text{а.г}}$ – высота зоны активного горения, м; $A_{\text{т}}$ – ширина камеры сгорания, м; $C_{\text{т}}$ – глубина камеры сгорания, м; $a_{\text{ф}}$ – интегральная степень выгорания топлива; $B_{\text{р}}$ и $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – расход и теплота сгорания топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг соответственно; $B_{\text{р доп}}$ и $Q_{\text{н доп}}^{\text{р}}$ – расход и теплота сгорания подсветочного топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг; $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) – универсальная постоянная Стефана – Больцмана; $a_{\text{т}}$ – степень

черноты факела, принимается согласно [20–22];

$\sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i F_i)_{\text{а.г}}$ – комплекс эффективной поверхности

тепловосприятия зоны активного горения по нормативной методике теплового расчета, м²;

член уравнения $c_{\text{рт}} (T_{\text{ф0}} - T_0) (1 - a_{\text{ф}}) B_{\text{р}}$ соответствует количеству теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей части топлива $(1 - a_{\text{ф}}) B_{\text{р}}$, кг/с, член уравнения

$c_{\text{рв}} (T_{\text{ф0}} - T_0) \rho_0 \nu_0 \left[(1 - a_{\text{ф}}) + (\alpha - 1) \right] B_{\text{р}}$ – количество теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей и избыточной части воздуха

$\rho_0 \nu_0 \left[(1 - a_{\text{ф}}) + (\alpha - 1) \right] B_{\text{р}}$, кг/с; $c_{\text{рг}} (T_{\text{ф0}} - T_0) \rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}} r B_{\text{р}}$ – количество теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев газов рециркуляции в количестве $\rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}} r B_{\text{р}}$,

кг/с; $c_{\text{рт}}$, $c_{\text{рв}}$, $c_{\text{рг}}$ – теплоемкость топливного остатка, воздуха и газов рециркуляции при средней температуре на участке воспламенения $T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$ по (2),

кДж/(кг·К); ν_0 , $\nu_{\text{г}}$ – объемы воздуха и продуктов сгорания, отнесенные к нормальным условиям и 1 кг топлива, м³/кг; ρ_0 , $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха и продуктов сгорания при средней температуре на участке воспламенения $T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$ по (2), кг/м³.

Выводы

1. Использование предложенных модели и методики оценки факельных характеристик топок промышленных котлов в комбинации с основным нормативным методом расчета ее суммарного теплообмена повышает достоверность получаемых результатов и, как следствие, эффективность внедряемых мероприятий, упрощает проведение наладки и испытаний основного и вспомогательного оборудования.

2. Представленная модель топки и расчетная методика могут быть использованы при переводе промышленных котлов на современные технологии газосжигания с пониженной эмиссией оксидов азота и одновременным повышением надежности теплонапряженных элементов.

3. Влияние конструктивного изменения угла наклона горелок, степени загрузки ярусов реагентами, разнесения по высоте зоны охлаждения (дожигания) воздушно-дожигательных сопел на изменение температурны $T_{\text{т}}^{\text{ср}}$ при необходимости оценивается уравнениями основного нормативного метода суммарного теплового расчета топок, а соответствующие изменения параметра $T_{\text{а.г}}^{\text{ср}}$ определяются по балансу теплоты зоны охлаждения.

4. Оценку коэффициента эффективности экранов по тепловым характеристикам факела можно производить по тепловым балансам как основ-

ного нормативного, так и дополнительного позонного методов теплового расчета топочных камер.

5. Рассмотренные модель топочного устройства и методические рекомендации по оценке тепловых характеристик факела ограничены случаями, отраженными в настоящей статье. В дальнейшем их можно расширять, пополняя расчетную базу опытными данными.

Литература

1. Сжигание челябинского угля, природного газа, коксового и доменного газов в котлах ПК-14 металлургического комбината / Вл.В. Осинцев, Вал.В. Осинцев, В.И. Кузин и др. // *Промышленная энергетика*. – 1989. – № 12. – С. 35–39.

2. Применение многотопливных плоскофакельных горелок для обеспечения расчетных параметров котлов ТЭЦ металлургических заводов / Е.К. Чавчанидзе, А.В. Шатиль, В.В. Компанец и др. // *Промышленная энергетика*. – 1982. – № 7. – С. 58–61.

3. Разработка и внедрение многотопливной горелки с саморегулируемым положением факела в топке и разделенными начальными участками горения / С.А. Махмудов, В.В. Компанец, О.В. Киселев и др. // *Промышленная энергетика*. – 1987. – № 1.

4. Данилин, Е.А. Оптимизация многотопливных плоскофакельных горелок паровых котлов ТЭЦ-ПВС заводов черной металлургии / Е.А. Данилин // *Промышленная энергетика*. – 1989. – № 7. – С. 27–31.

5. Осинцев, Вл.В. Анализ тепловых неравномерностей газов в топках парогенераторов / Вл.В. Осинцев, Вал.В. Осинцев // *Научные труды МЭИ «Повышение эффективности и надежности работы парогенераторов»: межвуз. сб.* – М.: МЭИ. – 1983. – Вып. 15. – С. 80–86.

6. Осинцев, В.В. Аэродинамика и температурные поля газоходов пылеугольных котлов / В.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 1989. – № 11. – С. 46–49.

7. 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.

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

9. 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, К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2005. – № 9. – С. 14–23.

10. Сжигание природного газа в слабоэкранированной топке котла Бабкок-Вилькокс с подовы-

ми горелками / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, М.П. Сухарев и др. // *Электрические станции*. – 2010. – № 6. – С. 8–14.

11. Осинцев, К.В. Повышение надежности топки и дымоотводящих элементов котла Бабкок-Вилькокс при сжигании природного газа в подовых щелевых горелках / К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2010. – № 4. – С. 2–8.

12. 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.

13. Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / К.В. Осинцев // *Электрические станции*. – 2009. – № 11. – С. 13–17.

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

15. 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.

16. Осинцев, К.В. Расчет характеристик начального участка полидисперсного факела при фронтальном прямоточном вводе реагентов в топку / К.В. Осинцев // *Тепловые процессы в технике*. – 2009. – Т. 1, № 9. – С. 379–382.

17. Перевод котла БКЗ-160 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // *Электрические станции*. – 1993. – № 3. – С. 25–29.

18. Перевод котла БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 на технологию сжигания природного газа с раздельным тангенциальным вводом реагентов в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов и др. // *Электрические станции*. – 1994. – № 7. – С. 12–17.

19. Schneider, A. Korrosionen und Beschädigungen auf der Rauchgasseite von Dampferzeugern / A. Schneider // *Mitt. Verein. Großkesselbesitzer*. – 1967. – Nr. 109. – S. 232–245.

20. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – М.; Л.: Энергия, 1973. – 256 с.

21. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.

22. Вербовецкий, Э.Х. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / Э.Х. Вербовецкий, Н.Г. Жмерик. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1996. – 270 с.

23. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 491 с.

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; osintcev2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию 18 мая 2014 г.

DOI: 10.14529/power150202

THE CALCULATION PROCEDURE FOR THERMAL CHARACTERISTICS OF THE FLAME DURING COMBUSTION OF INDUSTRIAL GASES

K.V. Osintsev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, osintcev2008@yandex.ru

The paper considers the thermal calculation procedure for the furnace-boiler systems of the steam-air-thermal power plants burning natural and industrial gases at counter flow and tangential inlet of chemicals. The author demonstrates that if calculation model and procedure are used within implementation of design works, adjustment and studies of boilers then the changeover to the modern fuel burning systems with reduced emission of nitrogen oxides, increased reliability of heat-stressed elements of the boiler equipment, and improved performance of thermal and mechanical equipment of the steam-air-thermal power plants. It is noted that suggested model and calculation procedure may be used as a basis for changeover to other constructions of furnace, burners and systems of fuel chemical inlet, and also to other kinds of industrial gases.

Keywords: power engineering equipment, boilers, blast furnace and coke oven gases, calculation procedure.

References

1. Osintsev V.V., Osintsev V.V., Kuzin V.I. et al. [Ignition of Chelyabinsk' Coal, Natural Gas, Coke Oven and Blast Furnace Gases on PK-14 Boilers of Metallurgical Enterprises]. *Promyshlennaya energetika* [Power Engineering], 1989, no. 12, pp. 35–39. (in Russ.)
2. Chavchanidze E.K., Shatil A.V., Kompaneets V.V. et al. [Application of Multifuel Flatflamed Burners for Maintenance of Calculated Parameters of TPP Boilers of Metallurgical Enterprises]. *Promyshlennaya energetika* [Power Engineering], 1982, no. 7, pp. 58–61. (in Russ.)
3. Makhmudov S.A., Kompaneets V.V., Kiselev O.V. and et al. [Development and Introduction of Multifuel Burner with Self Regulating Position of Flame into the Furnace and Separated Initial Ignition Areas]. *Promyshlennaya energetika* [Power Engineering], 1987, no. 1. (in Russ.)
4. Danilin E.A. [Optimization of Multifuel Flatflamed Burners of Steam Generators of TPP-SABS of Ferrous Metallurgy Factories]. *Promyshlennaya energetika* [Power Engineering], 1989, no. 7, pp. 27–31. (in Russ.)
5. Osintsev V.V., Osintsev V.V. [Analysis of Thermal Nonuniform of Gases in Furnaces of Steam Generators]. *Trudy MEI* [Proceedings of the MEI]. Moscow, MEI, 1983, no 15, pp. 80–86. (in Russ.)
6. Osintsev V.V. [Aerodynamics and temperature fields of flues coal-fired boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1989, no. 11, pp. 46–49. (in Russ.)
7. Osintsev V.V., Osintsev V.V., Khidiyatov A.M. et al. [Improvement of Methods for Reducing the Temperature Nonuniforms in Furnaces Fitted Frontal Burners]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1990, no. 4, pp. 23–26. (in Russ.)
8. Osintsev K.V., Osintsev V.V. [Taking into Account the Nonuniform and Unstable Thermal Fireball when Using Multifunctional Burners]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2007, no. 54, pp. 492–497. (in Russ.) DOI: 10.1134/S0040601507060146
9. Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V., Osintsev K.V. [Controlling the Thermal Structure of the Flame in the Furnaces of BKZ-210-140F Boilers with Single-Tier Frontal Arrangement of Multifunctional Burners when Burning Various Kinds of Fuel]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2005, no. 52, pp. 678–687. (in Russ.)
10. K.V. Osintsev, V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, S.V. Pashnin, A.P. Okunev, Sabelfeld V.A. [Ignition of Natural Gas into the Low-Deflecting Furnace of a Babcock-Wilcox Boiler with Bottom Slot Burners]. *Power Technology and Engineering*, 2010, no. 6, pp. 8–14. (in Russ.)

11. Osintsev K.V. [Improving the Reliability of the Furnace and Gas Conduits of a Babcock-Wilcox Boiler During the Firing of Natural Gas in Bottom Slot Burners]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2010, no. 57, pp. 273–281. (in Russ.) DOI: 10.1134/S0040601510040014
12. Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V., Osintsev K.V. [Improvement of the Process of Fuel Firing on BKZ-210-140F Boilers]. *Power Technology and Engineering*, 2007, no. 41, pp. 34–40. (in Russ.)
13. Osintsev K.V. [Method for Reducing the Heat Flux onto Burner Ports]. *Power Technology and Engineering*, 2010, no. 44, pp. 47–51. (in Russ.) DOI: 10.1007/s10749-010-0140-1
14. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Sukharev M.P. et al. [Shifting the Equipment of Thermal Power Stations for Firing Different Kinds of Fuels in Flames Using the Technology of Distributed Admission of Reagents into the Furnace]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2008, no. 55, pp. 355–360. (in Russ.) DOI: 10.1134/S0040601508040174
15. Osintsev V.V., Kuznetsov G.F., Petrov V.V. Sukharev M.P. [Specific Features and Organization of Flame Process in a Furnace Fitted with Multifunctional Burners]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2002, no. 11, pp. 14–19. (in Russ.)
16. Osintsev K.V. [Calculating the Parameters Characterizing the Initial Part of a Polydispersed Flame with Reagents Admitted into the Furnace in a Frontal Straight-Flow Manner]. *Teplovye Protsessy v Tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2009, no. 1 (9), pp. 379–382. (in Russ.)
17. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Gigin V.Ya. et al. [Changeover BKZ-160 Boiler to Staged Combustion Technology]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1993, no. 3, pp. 25–29. (in Russ.)
18. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Kuznetsov G.F. et al. [Changeover BKZ-210-140F Boiler to Combustion Technology with Separate and Peripheral Inlet of Reagents into the Furnace]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1994, no. 7, pp. 12–17. (in Russ.)
19. Schneider A. Korrosionen und Beschädigungen auf der Rauchgasseite von Dampferzeugern. *Mitt. Verein. Großkesselbesitzer*, 1967, no. 109, pp. 232–245.
20. *Teplovoy raschet kotelnykh agregatov. Normativny metod* [Thermal Design of Boilers. A Standard Method], a revised and extended 2nd edition, Moscow & St. Petersburg, Energy, 1973. 256 p.
21. *Teplovoy raschet kotlov. Normativny metod* [Thermal Design of Boilers. A Standard Method], a revised and extended 3rd edition, St. Petersburg, NPO TsKTI, 1998. 257 p.
22. Verbovetskiy E.Kh., Zhmerik N.G. *Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu topochnykh ustroystv energeticheskikh kotlov* [Guidelines for Design of Boilers' Furnaces], St. Petersburg, NPO TSKTI-VTI, 1996. 270 p.
23. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow, ASUSSR, 1947. 491 p.

Received 18 May 2014

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Осинцев, К.В. Методика расчета тепловых характеристик топочного факела при сжигании промышленных газов / К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 11–19. DOI: 10.14529/power150202

REFERENCE TO ARTICLE

Osintsev K.V. The Calculation Procedure for Thermal Characteristics of the Flame During Combustion of Industrial Gases. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 11–19. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150202
