

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ТОПОК С ЖИДКИМ ШЛАКОУДАЛЕНИЕМ

К.В. Осинцев

Представлена теплофизическая модель топочного устройства с жидким шлакоудалением и методика ее теплового расчета 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 теплонапряженных элементов котельного оборудования. 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 топлива.

Ключевые слова: котельные агрегаты, жидкое шлакоудаление, методика расчета.

Введение

При наладке, испытаниях и проектировании систем топливного сжигания промышленных котлов определяют рабочие характеристики топочно-го факела. В топках с жидким шлакоудалением они необходимы для оценки вязкостных характеристик, текучести (или транспортной способности) выплавляемого из породных включений шлака, а также термической надежности отдельных конструктивных элементов. Для этого помимо привлечения отдельных опытных данных производят комбинированные расчеты с использованием как основного нормативного метода суммарного теплообмена в топке, так и различных дополнительных методик с выделением специфических зон [1–3]. Среди последних наиболее удобной является методика последовательных тепловых расчетов зоны активного горения с размещенными на стенах горелками и шлаковыводящей леткой в подду и зоны охлаждения (дожигания) с выходным окном, примыкающим к дымоотводящему котловому газопроводу с конвективными поверхностями нагрева [3]. Методика позволяет отслеживать колебания средней температуры топочного факела в зоне активного горения, в том числе и при работе котла на минимально допустимой нагрузке, и устанавливать ее выше нормируемого значения температуры, обеспечивающего устойчивое образование и сток жидкой шлаковой пленки в летку $T_{а.г}^{ср} > T_{а.г}^{нн}$ [3]. В выходном же окне средняя температура факела не должна превышать также нормируемое значение температуры начала шлакования $T_{т}^{ср} < T_{т}^{нн}$ [1–3].

Актуальность темы

В нормативных методиках расчета тепловых характеристик факела недостаточно корректно осуществляется учет термогазодинамической неравномерности [1–3]. Отклонения максимальной температуры факела от среднего значения в выходном окне промышленной топки могут достигать 100–150 К, а в зоне активного горения дохо-

дить до 150–250 К и более [4–19]. При этом максимумы температуры могут менять свое местоположение в сечении топочной камеры. Известные методики, констатируя факт существования неравномерности, определяют гипотетическое местоположение максимума температуры в центре топочных камер, хотя еще с 70-х годов прошлого столетия специалисты стали выявлять и фиксировать связь схем компоновки и включения горелок с местоположением максимумов и минимумов скорости и температуры факела в поперечных сечениях зон активного горения, охлаждения [4–16]. Отсутствие должного учета температурной неравномерности провоцирует появление существенной расчетной погрешности: отклонения средней расчетной температуры факела от реальных значений в промышленных котлах нередко превышают 7 %. При этом усложняется наладка разрабатываемых и внедряемых мероприятий, в том числе по переходу на современные технологии топливного сжигания при пониженной эмиссии оксидов азота NO_x .

Предлагаемая модель топки с жидким шлакоудалением

Для повышения точности оценки температурных характеристик факела и эффективности их регулирования ранее была предложена скорректированная расчетная модель топочного устройства промышленного котла с двумя выделяемыми зонами [4, 9]. Она изначально была привязана к однорядной компоновке горелок на фронтальной стене топки с твердым шлакоудалением. Основное предназначение модели – перевод промышленных котлов, работающих на буром угле ухудшенного качества, на новые технологии пылесжигания при пониженной эмиссии оксидов азота и одновременном повышении надежности и эффективности топочного оборудования. При переходе к иным системам сжигания, в том числе реализуемым в топках с жидким шлакоудалением, необходима доработка расчетной модели.

Предлагаемая модель расчета факельных параметров касается промышленных котлов с ранее исследованными вариантами топочных устройств, настроенных на жидкое шлакоудаление при сжигании кузнецких углей с широким спектром теплофизических свойств [14–16]. Она отражает как существующие, так и новые тенденции в организации способов ввода и зажигания реагентных потоков и в общем виде выглядит следующим образом.

1. Рабочий объем топки в соответствии с упомянутыми выше аналогами разделен на последовательные зоны активного горения и охлаждения, рис. 1 [3, 4, 9].

2. Зона активного горения включает нижнюю часть топочной камеры с горелками от подового перекрытия с леткой до сечения над горелками.

2.1. Верхняя граница зоны активного горения выбирается согласно нормативным рекомендациям [1–3].

2.2. Горелки – стандартные прямооточные и вихревые смесительного типа и с узлами сопло-

го рассредоточенного ввода реагентных потоков в топку, обеспечивающими снижение активности образования NO_x (по патентной версии «многофункциональные горелочные устройства»). Конструкционные и связанные с ними режимные расходно-скоростные характеристики горелок смесительного типа определяются методическими материалами [3]. Параметры многофункциональных горелок выбираются с учетом накапливаемого опыта и рекомендаций [4–16].

2.3. Схемы компоновки горелок на стенах ограничены исследованными вариантами: встречные, рис. 1, а, в, тангенциальные, рис. 1, б.

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 сброса системы пылеприготовления, либо газов рециркуляции.

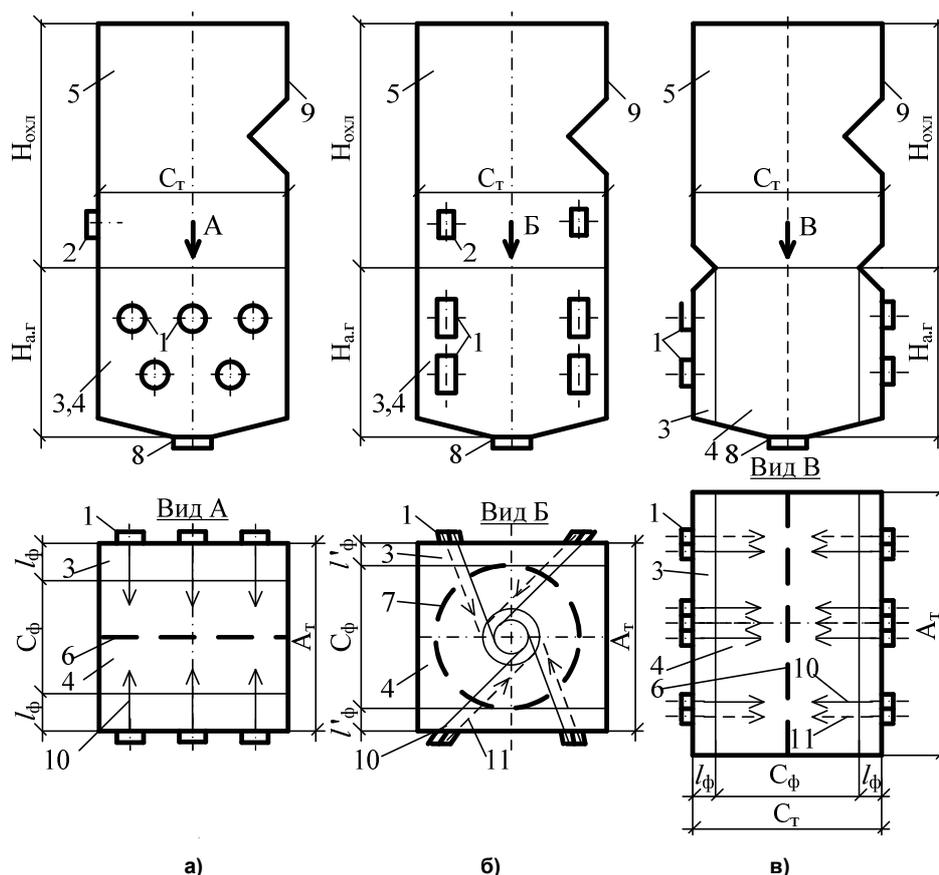


Рис. 1. Примеры выделения расчетных зон и участков факела в топках с жидким шлакоудалением: а – встречная компоновка круглых вихревых или прямооточных горелок смесительного типа на боковых стенах и сбросных сопел на фронтальной стене топки с соотношением сторон $A_T/C_T \approx 1,0$; б – тангенциальная компоновка многофункциональных горелок с узлами соплового рассредоточенного ввода реагентов и сбросных сопел на боковых стенах топки с соотношением сторон $A_T/C_T \approx 1,0$; в – встречная компоновка многофункциональных горелок с узлами рассредоточенного ввода реагентов на фронтальной и задней стенах топки с соотношением сторон $A_T/C_T \geq 1,5$; 1 – горелки; 2 – сбросные сопла; 3, 4 – зона активного горения с участком воспламенения и горения при постоянной температуре; 5 – зона охлаждения; 6, 7 – условные плоскость и цилиндрическая поверхность развития максимумов скорости и температуры; 8 – летка; 9 – выходное окно; 10, 11 – потоки пылевоздушной смеси и дожигающего воздуха

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 $T_{\phi 0}$ и энтальпии $I_{\phi 0}$ топочной среды (газопылекоксовоздушной смеси), рис. 1.

5. Выделенные зоны и участки ограничены поверхностями и объемами со следующими внутритопочными размерами.

5.1. Размеры основных зон, в том числе их высота $H_{а.г}$ и $H_{охл}$, м, а также межгорелочные расстояния и количество ярусов горелок определяют согласно методическим указаниям с традиционной проверкой и привязкой по теплонапряжению $q_{а.г}$ сечений топочных камер [1–3].

5.2. Дополнительно выделяют площадь поперечного сечения $F_{в}$, м² 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.

5.3. Площадь поперечного сечения горизонтального участка горения с условно постоянной температурой определяют как $F_{\phi} = F_{т} - F_{в}$, м², рис. 1. Длина этого участка для топок со встречной компоновкой горелок $C_{\phi} = C_{т} - 2l_{\phi}$, или $C_{\phi} = A_{т} - 2l_{\phi}$, где $\Psi_{э}^{а.г} = \varphi_1(T_{а.г}^{ср})$, $A_{т}$ – соответственно глубина и ширина топки, м. Для разработанных авторских схем тангенциального ввода реагентных потоков в топку с двух противоположных стен можно сохранить аналоговую запись $C_{\phi} = C_{т} - 2l'_{\phi}$, или $C_{\phi} = A_{т} - 2l'_{\phi}$, 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 [4, 9]:

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

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 исследованных горелках смесительного типа, где происходит сильная эжекция топочных газов в амбразуры, горение мелкой пыли и выделяемых летучих веществ начинается еще до выхода реагентов в топку, здесь как правило, $l_{\phi} \leq 0,25$ м, а $T_0 \geq 1100$ К. При работе многофункциональных горелок с узлами рассредоточенного ввода реагентов в топку $l_{\phi} = 1,5-2,5$ м, а $T_0 < 1000$ К.

6.2. Средний уровень температуры факела на участке воспламенения:

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

Значения $T_{воспл}^{ср}$ приведены в таблице.

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 [4,9]:

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

Значения параметра n приведены в таблице.

6.4. На участке горения с условно постоянной температурой выгорает основная масса топлива (степень выгорания $a_{а.г}'' = 0,85-0,95$), а также формируется тепловая неравномерность факела, характер которой зависит от схем компоновки и включения горелок [5, 11, 12].

6.5. В зоне охлаждения происходит догорание топливного остатка и охлаждение экранами продуктов сгорания до средней температуры $T_{т}^{ср}$ в выходном окне топки, а также выравнивание динамических и температурных полей путем турбулентного перемешивания соседних слоев факельной среды и ее растечки в объеме топки с заполнением поперечных сечений [5, 11, 12].

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 [13].

Методика расчета

Для проведения оценочных предварительных тепловых расчетов и обработки результатов

Характеристики рассматриваемых систем сжигания топок с жидким шлакоудалением

№	Используемое топливо	Компоновка горелок	Тип горелок	Расчетные характеристики участка воспламенения					Срок службы горелок, т, лет	Выход оксидов азота, NO_x , мг/нм ³
				l_{ϕ} , м	T_0 , К	$T_{\text{восп}}^{\text{ср}}$, К	m	n		
1	Пыль кузнецкого угля марок Г и Д ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 20\,500\text{--}21\,500$ кДж/кг, $V^{\text{г}} = 39\text{--}42\%$; $A^{\text{с}} = 18\text{--}21\%$; $W^{\text{р}} = 10\text{--}12\%$)	Встречная	Смесительные вихревые Смесительные прямоточные Многофункциональные	$\leq 0,25$ $\leq 0,5$ $1,5\text{--}2,5$	~ 1200 ~ 1100 ~ 1000	$0,945T_{\phi}$ $0,945T_{\phi}$ $0,875T_{\phi}$	5,5 5,5 4,5	4,0 4,0 3,25	$\sim 1,0$ $\leq 2,0$ $\geq 10,0$	> 1200 > 900 450–550
2	То же	Тангенциальная	Смесительные прямоточные Многофункциональные	$\leq 0,5$ $1,5\text{--}2,5$	~ 1100 ~ 1000	$0,945T_{\phi}$ $0,875T_{\phi}$	5,5 4,5	4,0 3,25	$\leq 2,0$ $\geq 10,0$	700–800 350–450
3	Пыль кузнецкого угля марок Г и Д ухудшенного качества ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 18800\text{--}19600$ кДж/кг, $V^{\text{г}} = 38\text{--}40\%$; $A^{\text{с}} = 29\text{--}38\%$; $W^{\text{р}} = 12\text{--}16\%$)	Встречная	Смесительные вихревые Смесительные прямоточные Многофункциональные	$\leq 0,5$ $\leq 0,75$ $1,5\text{--}2,5$	~ 1100 ~ 1100 ~ 1000	$0,925T_{\phi}$ $0,925T_{\phi}$ $0,875T_{\phi}$	5,0 5,0 4,5	3,5 3,5 3,25	$\leq 2,0$ $\leq 4,0$ $\geq 10,0$	> 1200 > 900 450–550
4	То же	Тангенциальная	Смесительные прямоточные Многофункциональные	$\leq 0,75$ $1,5\text{--}2,5$	~ 1100 ~ 1000	$0,925T_{\phi}$ $0,875T_{\phi}$	5,0 4,5	3,5 3,25	$\leq 4,0$ $\geq 10,0$	700–800 350–450
5	Пыль каменного угля типа СС ($Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 19\,000\text{--}22\,000$ кДж/кг, $V^{\text{г}} = 20\text{--}30\%$; $A^{\text{с}} = 15\text{--}20\%$; $W^{\text{р}} = 8\text{--}12\%$)	Встречная	Смесительные вихревые	$\leq 0,25$	~ 1200	$0,945T_{\phi}$	5,5	4,0	–	> 1200
6	То же	Тангенциальная	Многофункциональные	$1,5\text{--}2,5$	~ 1000	$0,875T_{\phi}$	4,5	3,25	–	< 450

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 $T_{а.г}^{ср}$ и $T_{т}^{ср}$ и степени выгорания топлива в тех же сечениях $a_{а.г}''$ и $a_{т}''$. Для оценки работоспособности топочных леток, экранов и горелок, а также пароперегревательных поверхностей нагрева определяют локальные значения $T_{ф0}^{min}$, $T_{ф0}^{max}$ и $T_{т}^{max}$.

2. Параметр $T_{а.г}^{ср}$ определяется как средневзвешенный на двух участках факельного воспламенения и горения при уравнированном теплоотводе.

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

$$T_{а.г}^{ср} = \frac{T_{воспл}^{ср} 2l_{ф} + T_{ф0} (C_{т} - 2l_{ф})}{C_{т}}. \quad (4)$$

То же с размещением горелок на боковых стенах:

$$T_{а.г}^{ср} = \frac{T_{воспл}^{ср} 2l_{ф} + T_{ф0} (A_{т} - 2l_{ф})}{A_{т}}. \quad (5)$$

Для топков котлов при сжигании угольной пыли в горелках смесительного типа, размещаемых встречно на боковых стенах $T_{а.г}^{ср} \approx (0,990 - 0,995)T_{ф0}$; при использовании многофункциональных горелок $T_{а.г}^{ср} \approx (0,91 - 0,96)T_{ф0}$.

Для тангенциальной компоновки горелок в общем случае:

$$T_{а.г}^{ср} = \frac{T_{воспл}^{ср} (F_{т} - F_{ф}) + T_{ф0} F_{ф}}{F_{т}}. \quad (6)$$

При использовании авторских схем ввода реагентов с боковых стен (рис. 1, б) сохраняется аналоговая запись $T_{а.г}^{ср}$ по формуле (5) с заменой параметра $l_{ф}$ на $l'_{ф} \approx 0,5l_{ф}$; при $l_{ф} \approx 2,5$ м значения параметра $T_{а.г}^{ср} \approx (0,95 - 0,97)T_{ф0}$. Снижение параметра $l_{ф}$ до принимаемого в расчете $l'_{ф}$ связано с наличием радиально-тангенциальных составляющих скорости топливовоздушных потоков, истекающих из горелок на участке воспламенения.

3. Анализ эффективности леток, а также экранов поверхностей нагрева и термостойкости горелок проводится с учетом поправки на неравномерность распределения температуры в поперечных сечениях топки:

$$T_{ф0}^{min} = k_1' T_{ф0}, \quad (7)$$

$$T_{ф0}^{max} = k_1 T_{ф0}, \quad (8)$$

где $k_1 > 1,0$; $k_1' < 1,0$ – коэффициенты неравномерности,

определяются по результатам термогазодинамических продувок, в частности, для исследованного типа топков они могут быть заимствованы из литературы [5, 11].

При анализе параметр $T_{ф0}^{min}$ сравнивают с нормативным значением $T_{а.г}^{н}$. При $T_{ф0}^{min} > T_{а.г}^{н}$ должен обеспечиваться устойчивый выход шлака. При $T_{ф0}^{min} \leq T_{а.г}^{н}$ необходимо предусматривать меры повышения $T_{ф0}^{min}$, в частности, производить количественное перераспределение по ярусам реагентов, ограничивать снижение рабочей нагрузки.

4. Средняя температура факела на выходе из зоны охлаждения (или на выходе из топки) $T_{т}^{ср}$ определяется согласно методическим рекомендациям [1, 2].

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:

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

где k_2 – коэффициент неравномерности по ширине топки и выходного окна; k_3 – коэффициент неравномерности по высоте выходного окна. Для исследованного типа топков используют максимальное $k_2 \approx 1,05$ и табулированные значения k_3 [11–13]. 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 нормативным значением $T_{т}^{н}$. При $T_{т}^{max} \leq T_{т}^{н}$ обеспечивается бесшлаковочная работа пароперегревателя во всех режимах эксплуатации. При $T_{т}^{max} > T_{т}^{н}$ необходимо предусматривать меры снижения $T_{т}^{max}$, в частности, вводить газы рециркуляции в верхнюю часть зоны охлаждения топки [3]. 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 [11–13].

6. Коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 могут быть использованы в расчетах тепловосприятости экранов и пароперегревателя [1, 2]. В отсутствие иных опытных данных оценку максимальных удельных тепловосприятостей радиационных настенных экранов и ширмовых пароперегревателей в выходном окне топочной камеры производят согласно рекомендациям [1, 2].

7. В расчетах теплообмена в качестве степени выгорания топлива в выходном окне зоны активного горения следует принимать параметр a_{ϕ}'' в конце участка горения с условно постоянной температурой факела $T_{\phi 0}$. В оценочных расчетах в отсутствие опытных данных $a_{\phi}'' \approx a_{a.g}''^H$, $a_T'' \approx a_T''^H$ выбираются согласно нормативной и методической документации [1–3].

8. При проведении исследований в отсутствие прямых замеров радиационных потоков теплоты оценку загрязнения по коэффициенту эффективности экранов $\Psi_3^{a.g} = \varphi_1(T_{a.g}^{cp})$ в зоне активного горения и $\Psi_3^{окл} = \varphi_2(T_T^{cp})$ в зоне охлаждения можно производить расчетом, ориентируясь на опытные значения средней температуры $T_{a.g}^{cp} = f(T_{\phi 0})$ и $T_T^{cp} = \varphi_3(T_{a.g}^{cp}, T_T^{cp})$ соответственно согласно рекомендациям [1–3].

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 $l - (l + dl)$. Тепловой баланс с учетом реальных условий зажигания реагентной смеси выглядит следующим образом [4, 9]:

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

где dq_T – тепловой поток в направлении поступления реагентной смеси, кВт, образующийся при наличии продольного температурного градиента $(T_{\phi 0} - T_0)/l$, К/м; $dq_B(T)$ – тепловыделение, кВт, генерирующее продольный температурный градиент $(T_{\phi 0} - T_0)/l$, К/м; dq_H – теплота, необходимая для нагрева смеси; $dq_{доп}$ – приток теплоты с подсветочным топливом, кВт; $dq_{экр}$ – отвод теплоты к экранам, кВт; dq_p – затраты теплоты на нагрев непрореагировавшей части топлива и воздуха, кВт; $dq_{гр}$ – потери теплоты факела на нагрев газов рециркуляции, кВт.

После раскрытия и интегрирования всех членов уравнение (10) может быть представлено в удобной для инженерных расчетов форме, которая изложена ранее [4, 9].

10. В отсутствие опытных данных по a_{ϕ} при сжигании пыли оценку этого параметра можно произвести по предложенной ранее автором методике с использованием преобразованных формул В.И. Бабия и Ю.Ф. Куваева и практического пылераспределения за мельницами [4, 9, 21]. При этом расчетные значения будут отличаться от реально получаемых показателей степени выгорания топ-

лива на котле на 15 %, если система сжигания топлива оснащена горелками смесительного типа, до 5 %, если система сжигания оснащена горелками с узлами рассредоточенного соплового ввода реагентных потоков в топку.

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 топливосжигания 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 температуры T_T^{cp} при необходимости оценивается уравнениями основного нормативного метода суммарного теплового расчета топок, а соответствующие изменения параметра $T_{a.g}^{cp}$ определяются по балансу теплоты зоны охлаждения.

4. Влияние степени загрязнения экранов (или коэффициента их эффективности) на тепловые характеристики факела можно оценивать по тепловым балансам как основного 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 как в части конструктивных элементов, так и видов сжигаемого топлива, пополняя расчетную базу опытными данными.

Литература

1. Кузнецов, Н.В. *Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)* / Н.В. Кузнецов. – М.; Л.: Энергия, 1973. – 256 с.
2. *Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп.* – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.
3. Вербовецкий, Э.Х. *Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов* / Э.Х. Вербовецкий, Н.Г. Жмерик. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1996. – 270 с.
4. *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.

5. 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.

6. 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.

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

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

10. 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.

11. Осинцев, В.В. Анализ тепловых неравномерностей газов в топках парогенераторов / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Научные труды МЭИ «Повышение эффективности и надежности работы парогенераторов». Межвузовский сборник. – М.: МЭИ, 1983. – Вып. 15. – С. 80–86.

12. 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.

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

14. Повышение эффективности использования технологии ступенчатого сжигания пыли кузнечного угля на котлах ПК-40 с жидким шлакоудалением / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, О.В. Дронов и др. // Электрические станции. – 1995. – № 9. – С. 37–44.

15. Выбор технологии сжигания сгущенных шламов в энергетических котлах / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.П. Костовецкий и др. // Электрические станции. – 1990. – № 6. – С. 12–15.

16. Ступенчатое сжигание пыли кузнечного угля на котлах ПК-40 с жидким шлакоудалением / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев и др. // Электрические станции. – 1989. – № 11. – С. 46–49.

17. Сжигание непроектного антрацита с газом в топке котла ТПП-210 / И.Н. Шницер, Л.К. Соловьев, О.К. Грицанюк и др. // Электрические станции. 1986. – № 5. – С. 32–37.

18. Шагалова, С.Л. Сжигание твердого топлива в топках парогенераторов / С.Л. Шагалова, И.Н. Шницер. – Л.: Энергия, 1976. – 175 с.

19. Шницер, И.Н. Исследование топочного процесса при сжигании непроектного антрацита отдельно и совместно с газом / И.Н. Шницер // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 16–22.

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

21. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

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

Поступила в редакцию 15 августа 2014 г.

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR STRUCTURE IDENTIFICATION OF GAS FLAME

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

The paper considers a thermophysical model of slag-tap-furnace and method of its thermal calculation for variants with opposed and tangential additive inlet. Using of these model and calculation method at design, commissioning and trials of industrial boilers facilitates shifting to new combustion systems, decreases NO_x emission, improves reliability and increases overhaul life of boiler equipment. In the paper it is noted that the proposed model and calculation method can be used as a base for developing of other structures of furnaces, burners and additive inlet systems, and, also, different types of fuel.

Keywords: boilers, liquid slag removal, calculation method.

References

1. *Teplovoy raschet kotelnikh agregatov. Normativny metod* [Thermal Design of Boilers. A Standard Method], a revised and extended 2nd edition. Moscow & St. Petersburg, Energy, 1973. 256 p.
2. *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.
3. 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.
4. 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.)
5. 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.)
6. 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.)
7. Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V., Osintsev K.V. [Improvement of the Process of Fuel Firing on BKZ-210-140F Boilers]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2007, no. 41, pp. 34–40. (in Russ.)
8. Osintsev K.V. [Method for Reducing the Heat Flux onto Burner Ports], *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2010, no. 44, pp. 47–51. (in Russ.)
9. 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]. *Teplovy Protsestry v Tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2009, no. 1 (9), pp. 379–382. (in Russ.)
10. 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.)
11. Osintsev V.I., Osintsev Val.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.)
12. Osintsev V.I., Osintsev Val.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.)
13. Osintsev V.V. [Aerodynamics and temperature fields of flues coal-fired boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1989, no. 11, pp. 46–49. (in Russ.)
14. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Dronov O.V. et al. [Improvement of the Staged Combustion Technology Kuznetsk Coal Dust on PK-40 Boilers with Liquid Slag Removal]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1995, no. 9, pp. 37–44. (in Russ.)
15. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Kosovetskiy S.P. et al. [Selection the Combustion Technology of Condensed Sludges in Power Boilers]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1990, no. 6, pp. 12–15. (in Russ.)

16. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Gordeev S.V. et al. [Staged Combustion Technology of Kuznetsk' Coal Dust on PK-40 Boilers with Liquid Slag Removal]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1989, no. 11, pp. 46–49. (in Russ.)

17. Shnitser I.N., Solovev L.K., Gritsanyuk O.K. et al. [Co-ignition of non-project anthracite and gas into the furnace of TPP-210 boiler]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1986, no. 5, pp. 32–37. (in Russ.)

18. Shagalova S.L., Shnitser I.N. *Szhiganie tverdogo topliva v topkakh parogeneratorov* [Ignition of solid fuel into the furnace of steam generators]. Leningrad, Energiya. 175 p.

19. Shnitser I.N. [Investigation of furnace processes in case co-ignition of non-project anthracite and gas]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1988, no. 1, pp. 16–22. (in Russ.)

20. Frank-Kamenetskiy D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics]. Moscow, ASUSSR, 1947. 491 p.

21. Babiy V.I., Kuvaev Yu.F. *Gorenie ugolnoy pyli I rasshchet pyleugolnogo fakela* [Combustion of pulverized coal and design of a pulverized coal flame]. Moscow, Energoizdat, 1986. 210 p.

Received 15 August 2014