

# РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА С РАЗЛИЧНЫМИ КОМПОНОВКАМИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

**К.В. Осинцев**

Предложенная ранее расчетная модель топочного устройства с фронтальной компоновкой горелок, включающая зоны активного горения и охлаждения с дополнительным разделением зоны активного горения на участки воспламенения и горения при уравновешенном теплоотводе с условно постоянной температурой факела, нашла применение при разработке и наладке новых, а также реконструкции существующих систем топливного сжигания. Рассмотрена модель топочного устройства с твердым шлакоудалением и различными схемами настенной компоновки горелок, используемая для оценки тепловых характеристик факела при ведении проектно-конструкторских работ, наладке и исследованиях котлов. Предложена методика пользования моделью. Вносимые предложения позволяют повысить надежность системы ввода в топку реагентных и регулируемых инертных потоков, минимизировать шлакование при сжигании шлакоудалительных твердых топлив, увеличить межремонтный срок службы котельного оборудования. Использование разработанных модели и методики расчета тепловых характеристик факела позволяет задавать эффективные эксплуатационные режимные и конструктивные параметры системы ввода в топку реагентных и регулируемых инертных потоков, дополнительно обеспечивать повышенную надежность котловых элементов при переводе агрегатов с одного вида топлива на другой. Методика оценки температурных характеристик факела с использованием двухзонной модели топки не претендует на завершенность с полным охватом возможных технических вариантов схем компоновки и конструкций горелок. Вместе с тем методика позволяет использовать ее в качестве базовой при отработке новых типов топок и горелок, пополнять расчетную базу опытными данными, с учетом которых осуществлять последующую проектную оценку надежности элементов подобных устройств.

*Ключевые слова:* котел, горелка, модель, методика.

## Введение

Для оценки и регулирования температуры факела при исследованиях процессов горения, проведения реконструкций с перепроектированием и наладкой систем топливного сжигания на котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 была предложена расчетная модель топочного устройства с твердым шлакоудалением [1]. Она охватывала более полный объем необходимых для отмеченных целей параметров факела, чем рекомендуемые существующими расчетными методиками аналоги [2–4].

## Актуальность темы исследования

Весьма удачными оказались попытки по использованию модели в разработке и наладке новых низкоэмиссионных и высоконадежных горелок с рассредоточенными сопловыми узлами ввода реагентных потоков в топку (по патентной версии «многофункциональных горелочных устройств») при сжигании природного газа и пыли разнородного угля [1, 5–10]. Внедрение этих горелок на упомянутых котлах БКЗ-210-140Ф позволило продлить межремонтный срок с  $\tau = 0,5\text{--}2,0$  года до  $\tau \geq 12$  лет, организовать сжигание высококалорийного челябинского бурого угля в бесшлаковочных режимах при пониженной температуре факела.

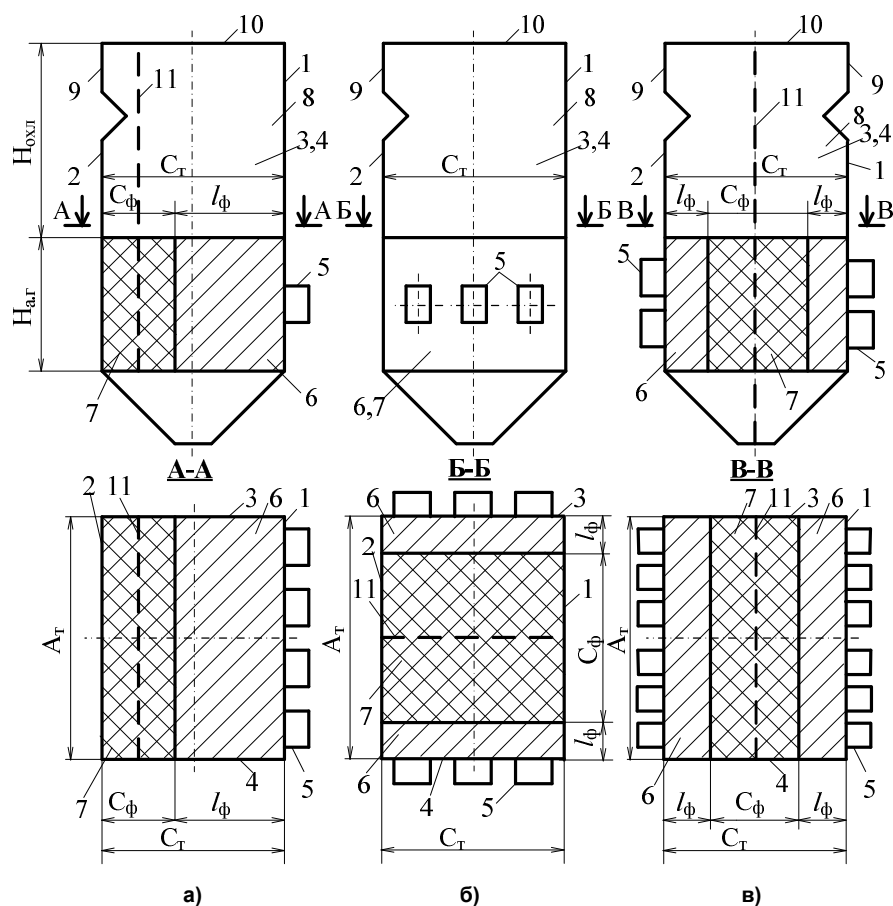
## Постановка задачи исследования

Модель топочного устройства с твердым шлакоудалением изначально была разработана для конкретной схемы однорядной компоновки горелок на фронтальной стене топки [1]. При переходе к иным системам сжигания, в частности, со встречным и тангенциальным вводами реагентных потоков в топку, требовалась ее доработка.

## Теоретическая часть исследования

Ниже приводится описание модели топочного устройства с твердым шлакоудалением, имеющей расширенный практический диапазон использования в части размещения горелок на стенах, а также необходимые рекомендации для оценочных расчетов.

1. В качестве базовой принимается модель топочного устройства с твердым шлакоудалением [4]. Горелки – стандартные прямоточные и вихревые смесительного типа и многофункциональные с узлами соплового рассредоточенного ввода реагентных потоков в топку. Схемы компоновки горелок: фронтальная (рис. 1, а), встречные по вариантам (рис. 1, б, в), тангенциальные, ограниченные исследованными вариантами автора (рис. 2). Конструкционные и связанные с ними режимные расходно-скоростные характеристики горелок смесительного типа определяются методическими материалами [4]. Параметры многофункциональных



**Рис. 1. Схемы выделения зон и участков факела в топке: а – фронтальная компоновка горелок и П-образная компоновка газоходов; б – встречная компоновка горелок на боковых стенах и П-образная компоновка газоходов; в – встречная компоновка горелок и Т-образная компоновка газоходов; 1, 2, 3, 4 – фронтная, задняя и боковые стены, 5 – горелки, 6, 7 – участки воспламенения и горения с уравновешенным теплоотводом; 8 – зона охлаждения продуктов сгорания; 9 – выходное окно; 10 – потолочное перекрытие топки; 11 – условная плоскость развития максимумов скорости и температуры**

горелок выбираются с учетом накапливаемого опыта и рекомендаций [1, 5–18].

2. Для ведения тепловых расчетов и анализа результатов исследований рабочий объем топки в соответствии с известным приемом «Норм теплового расчета котлов» разделен на зоны [2–4]. В исследованиях, проводимых автором на котлах, выделялись две характерные зоны, которые в топочной технике принято называть зоной «активного горения» и зоной «охлаждения», рис. 1 [1–18].

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

В исследованных топках без организации дополнительных сбросов топливных потоков над и под основными горелками, где расстояние между нижними образующими горелок нижнего яруса и верхней отметкой холодной воронки  $H_n \leq 2$  м, нижняя и верхняя границы зоны активного горения выбирались согласно рекомендациям «Норм теплового расчета котлов» [2–4]. Здесь отметка нижней границы соответствовала горизонтальной

плоскости, ограничивающей холодную воронку сверху, а отметка верхней границы размещалась на  $\sim 1,5$  м выше верхних образующих амбразур горелок верхнего яруса. При наличии систем топливного сброса после пылеконцентраторов, а также  $H_n > 2$  м, холодную воронку выделяют в отдельную для тепловых расчетов зону, а нижнюю и верхнюю границы зоны активного горения определяют согласно рекомендациям [4].

2.2. 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, либо двумя симметрично размещенными окнами при Т-образной компоновке топки с газоходами.

2.3. 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 эн-

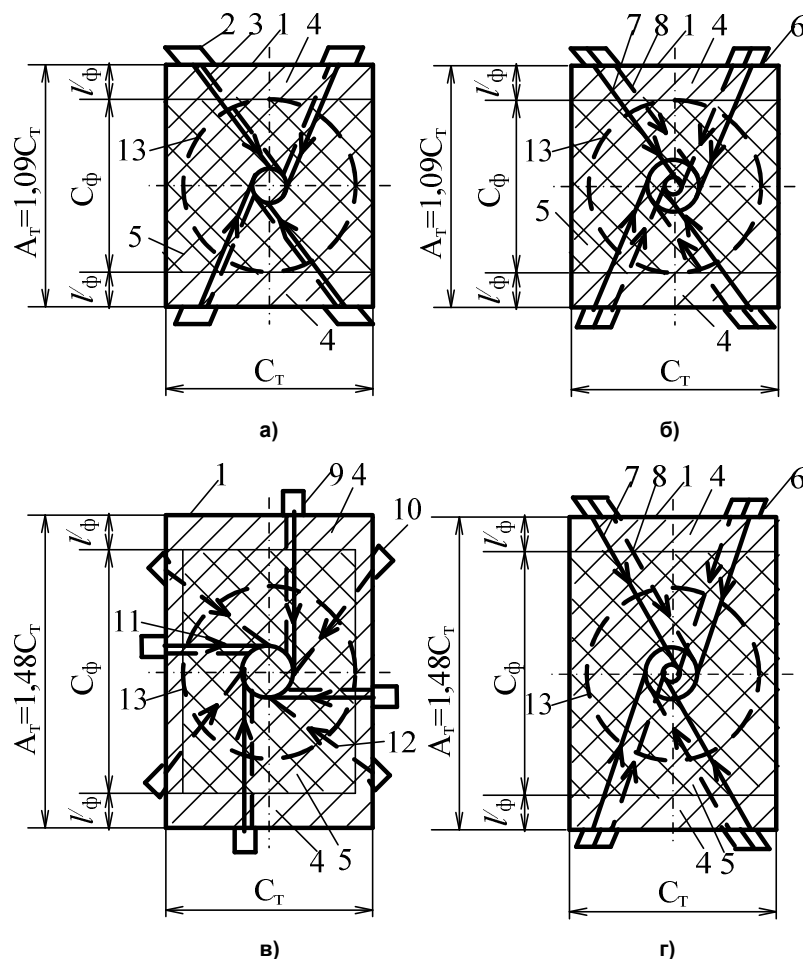


Рис. 2. Схемы выделения дополнительных участков в выходном сечении зоны активного горения при исследованных вариантах тангенциального ввода реагентов в топку: а, б – котел БКЗ-160 со смесительными и многофункциональными горелками; в, г – котел БКЗ-210-140Ф с соплами рассредоточенного ввода реагентов в топку и с многофункциональными горелками; 1 – топка; 2 – стандартные горелки смесительного типа; 3 – вектор выхода топливовоздушной смеси из горелок 2; 4, 5 – участки воспламенения и горения с уравновешенным теплоотводом; 6 – многофункциональные горелки с разделительным сопловым вводом потоков топлива и воздуха; 7, 8 – векторы выхода потоков топливовоздушной смеси и воздуха из горелок 6; 9, 10 – сопла выпуска топливовоздушной смеси и воздуха; 11, 12 – векторы выхода потоков топливовоздушной смеси и воздуха из сопел 9, 10; 13 – условная цилиндрическая поверхность развития максимальных скорости и температуры

тальпии  $I_{\phi 0}$  топочной среды (газопылекоксозвушной смеси).

3. Выделенные зоны и участки ограничены внутритопочными размерами.

3.1. 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 «Нормам теплового расчета котельных агрегатов», либо методическим указаниям [2–4]. При этом осуществляют традиционную проверку и привязку по теплонапряжению  $q_{а.г}$  сечений топочных камер [2–4].

3.2. Дополнительно выделяют площадь поперечного сечения и длину горизонтального участка факельного воспламенения  $F_{в}$  и  $l_{\phi}$ , м<sup>2</sup> и м соответ-

венно, при этом последняя соответствует расстоянию от экранов с амбразурами горелок до участка горения с условно постоянной температурой  $T_{\phi 0}$  (рис. 1, 2).

3.3. Площадь поперечного сечения горизонтального участка горения с условно постоянной температурой определяют как  $F_{\phi} = F_{т} - F_{в}$ , м<sup>2</sup> (рис. 1, 2). Длина этого участка для топок с фронтальной компоновкой горелок  $C_{\phi} = C_{т} - l_{\phi}$ , где  $C_{т}$  – глубина топки, м; для топок со встречной компоновкой горелок  $C_{\phi} = C_{т} - 2l_{\phi}$ , или  $C_{\phi} = A_{т} - 2l_{\phi}$ , где  $A_{т}$  – ширина топки, м (рис. 1). Для разработанных авторских схем тангенциального ввода реагентных потоков в топку с двух противоположных стен (рис. 2, б, г) можно сохра-

## Теплоэнергетика

нить аналоговую запись  $C_{\phi} = C_T - 2l'_{\phi}$ , или  $C_{\phi} = A_T - 2l'_{\phi}$ , м, где  $l'_{\phi} \approx 0,5l_{\phi}$ .

4. В выделенных зонах и участках топочных камер протекают следующие процессы.

4.1. На участке факельного воспламенения длиной  $l_{\phi}$  под влиянием нарастающего 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 (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 [1]:

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

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 [1, 6–18]. Там же приведены данные по  $T_0$ . Параметры  $l_{\phi}$  и  $T_0$  связаны с конструкцией горелок. В исследованных горелках смесительного типа, где происходит сильная эжекция топочных газов в амбразуры, горение мелкой пыли и газа начинается еще до выхода реагентов в топку, здесь, как правило,  $l_{\phi} \leq 0,25$  м, а  $T_0 \geq 900$  К. При работе многофункциональных горелок  $l_{\phi} = 1,5-2,5$  м, а  $T_0 < 900$  К. В проектных оценках температурного режима факела принималось приближенное значение  $T_0 \approx 900$  К.

4.2. Средний уровень температуры факела на участке воспламенения:

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

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

**Характеристики участка воспламенения, полученные на котлах БКЗ-210-140Ф, БКЗ-220, БКЗ-160, ТП-35 для различных типов горелок и видов топлива [1, 5–18]**

№ п/п	Сжигаемое топливо	Конструкция горелок	Длина участка $l_{\phi}$ , м	Температурные характеристики		Параметры в уравнениях (1)–(3)	
				$T_0$ при $l = 0$ , К	$T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$ , К	$m$	$n$
1	Пыль челябинского бурого угля с породным балластом $W^p \geq 25\%$ , $A^c \geq 45\%$	Прямоточные и вихревые смесительного типа	0,25–0,50	$\geq 900$	$0,925 T_{\phi}$	5,0	3,5
2	Пыль бурых и каменных углей с выходом летучих $> 40\%$ : – без рециркуляции газов в мельницы; – с рециркуляцией газов в мельницы	Прямоточные смесительного типа	$\leq 0,25$	$> 900$	$0,945 T_{\phi}$	5,5	4,0
			$\leq 0,50$	$> 900$	$0,925 T_{\phi}$	5,0	3,5
3	Природный газ	Прямоточные и вихревые смесительного типа	$\leq 0,25$	$> 900$	$0,945 T_{\phi}$	5,5	4,0
4	Пыль каменного угля с выходом летучих $V^r = 20-30\%$	Вихревые смесительного типа	$\leq 0,25$	$\sim 900$	$0,875 T_{\phi}$	5,0	3,5
5	Пыль челябинского бурого угля с породным балластом $W^p \geq 28\%$ , $A^c \geq 45\%$ ; пыль бурых и каменных углей с выходом летучих $> 40\%$ с рециркуляцией газов в мельницы; пыль углеродосодержащего материала при $V^r \leq 3,0\%$ с газовой подсветкой; природный газ	Многофункциональные	1,5–2,5	$\sim 800$	$0,875 T_{\phi}$	4,5	3,25

4.3. 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 [1]:

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

Значения параметра  $n$  приведены в таблице.

4.4. На участке горения с условно постоянной температурой выгорает основная масса топлива (степень выгорания  $a''_{a.g} = 0,85-0,95$ ), а также формируется тепловая неравномерность факела, характер которой зависит от схем компоновки и включения горелок [6, 13–16].

4.5. В зоне охлаждения происходит догорание топливного остатка и охлаждение экранами продуктов сгорания до средней температуры  $T''_{a.g}$  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 [6, 13–16].

4.6. При развороте факела на выходе из зоны охлаждения скоростные и температурные поля деформируются со смещением местоположения максимума температуры в выходных окнах топочных камер [19].

#### Методические рекомендации по ведению тепловых расчетов

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  $T''_{a.g}$  и  $T''_T$  и степени выгорания топлива в тех же сечениях  $a''_{a.g}$  и  $a''_T$ . Для оценки работоспособности топочных и пароперегревательных поверхностей нагрева определяют максимальные локальные значения  $T''_{\phi 0}^{\max}$  и  $T''_T^{\max}$ .

2. Параметр  $T''_{a.g}$  определяется как средневзвешенный на двух участках факельного воспламенения и горения при уравновешенном теплоотводе.

Для фронтальной компоновки горелок:

$$T''_{a.g} = \frac{T''_{\text{воспл}} l_{\phi} + T_{\phi 0} (C_T - l_{\phi})}{C_T}. \quad (4)$$

Для исследованной топки котла БКЗ-210-140Ф при сжигании угольной пыли и природного газа в вихревых и прямоточных горелках смешительного типа с  $l_{\phi} \leq 0,5$  м параметр  $T''_{a.g} \approx 0,995 T_{\phi 0}$ . Для

топки того же котла с многофункциональными горелочными устройствами, размещаемыми на фронтальной стене с  $l_{\phi} = 1,5-2,5$  м, параметр

$$T''_{a.g} \approx (0,94-0,97) T_{\phi 0}.$$

Для встречной компоновки горелок:

$$T''_{a.g} = \frac{T''_{\text{воспл}} 2l_{\phi} + T_{\phi 0} (C_T - 2l_{\phi})}{C_T}, \quad (5)$$

$$T''_{a.g} = \frac{T''_{\text{воспл}} 2l_{\phi} + T_{\phi 0} (A_T - 2l_{\phi})}{A_T}. \quad (6)$$

Для топки котла БКЗ-210-140Ф при сжигании угольной пыли и газа в горелках смешительного типа, размещаемых встречно на боковых стенах  $T''_{a.g} \approx (0,990-0,995) T_{\phi 0}$ ; при использовании многофункциональных горелок  $T''_{a.g} \approx (0,91-0,96) T_{\phi 0}$ .

Для тангенциальной компоновки горелок в общем случае:

$$T''_{a.g} = \frac{T''_{\text{воспл}} (F_T - F_{\phi}) + T_{\phi 0} F_{\phi}}{F_T}. \quad (7)$$

При использовании авторских схем ввода реагентов с боковых стен (рис. 2, б, г) сохраняется аналоговая запись  $T''_{a.g}$  по формуле (6) с заменой параметра  $l_{\phi}$  на  $l'_{\phi} \approx 0,5 l_{\phi}$ ; при  $l_{\phi} \approx 2,5-4,5$  м значения параметра  $T''_{a.g} \approx (0,95-0,97) T_{\phi 0}$ . Снижение параметра  $l_{\phi}$  до принимаемого в расчете  $l'_{\phi}$  связано с наличием радиально-тангенциальных составляющих скорости топливовоздушных потоков, истекающих из горелок на участке воспламенения.

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

$$T''_{\phi 0}^{\max} = k_1 T_{\phi 0}, \quad (8)$$

где  $k_1$  – коэффициент неравномерности, определяется по результатам термогазодинамических продувок, в частности для исследованного типа топок [15].

При анализе параметр  $T''_{\phi 0}^{\max}$  сравнивают с нормативным значением  $T''_{a.g}^{\text{н}}$ . При  $T''_{\phi 0}^{\max} \leq T''_{a.g}^{\text{н}}$  обеспечивается бесшлаковочная работа экранов. При  $T''_{\phi 0}^{\max} > T''_{a.g}^{\text{н}}$  необходимо предусматривать меры снижения  $T''_{\phi 0}^{\max}$ , в частности вводить газы рециркуляции [5].

4. Средняя температура факела на выходе из зоны охлаждения (или на выходе из топки)  $T''_T$  определяется согласно методическим рекомендациям [2, 3].

5. Анализ работы пароперегревателя со стороны набегающего факела на загрязняемость про-

водится с учетом поправки на неравномерность распределения температуры по ширине и высоте выходного окна топки:

$$T_T^{\text{max}} = k_2 k_3 T_T^{\text{cp}}, \quad (9)$$

где  $k_2$  – коэффициент неравномерности по ширине топки и выходного окна;  $k_3$  – коэффициент неравномерности по высоте выходного окна. Для исследованного типа топок с фронтальной (рис. 1, а) и встречной (котлы типа П-57, ПК-39, рис. 1, в) компоновками горелок используют максимальное  $k_2 \approx 1,05$  и табулированные значения  $k_3$  [16, 20]. Для других типов топочных камер и схем компоновки горелок и газоходов (рис. 1, б, в; рис. 2) в отсутствие опытных данных  $k_2 \approx 1,0$ .

При анализе параметр  $T_T^{\text{max}}$  сравнивают с нормативным значением  $T_T^{\text{н}}$ . При  $T_T^{\text{max}} \leq T_T^{\text{н}}$  обеспечивается бесшлаковочная работа пароперегревателя во всех режимах эксплуатации. При  $T_T^{\text{max}} > T_T^{\text{н}}$  необходимо предусматривать меры снижения  $T_T^{\text{max}}$ , в частности вводить газы рециркуляции в верхнюю часть зоны охлаждения топки [5]. 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  $T_T^{\text{max}}$  в зоне охлаждения по технологии УралВТИ–МЭИ–ЮУрГУ [13, 16].

6. Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  могут быть использованы в расчетах тепловосприятости экранов и пароперегревателя [2, 3]. В отсутствие иных опытных данных оценку максимальных удельных тепловосприятостей радиационных настенных экранов и ширмовых пароперегревателей в выходном окне топочной камеры производят согласно рекомендациям [2, 3].

7. В расчетах теплообмена в качестве степени выгорания топлива в выходном окне зоны активного горения следует принимать параметр  $a_{\text{ф}}''$  в конце участка горения с условно постоянной температурой факела  $T_{\text{ф0}}$ . В оценочных расчетах в отсутствие опытных данных  $a_{\text{ф}}'' \approx a_{\text{а.г}}^{\text{н}}$ ,  $a_{\text{т}}'' \approx a_{\text{т}}^{\text{н}}$ , выбираются согласно нормативной и методической документации [2–4]. Во всех вариантах ввода газоздушных реагентов в топку степень выгорания природного газа  $a_{\text{т}}'' \approx 1,0$ .

8. При проведении исследований в отсутствие прямых замеров радиационных потоков теплоты оценку коэффициента эффективности экранов  $\Psi_{\text{э}}^{\text{а.г}} = \varphi_1(T_{\text{а.г}}^{\text{cp}})$  в зоне активного горения и  $\Psi_{\text{э}}^{\text{охл}} = \varphi_2(T_{\text{т}}^{\text{cp}})$  в зоне охлаждения можно произ-

водить расчетом, ориентируясь на опытные значения средней температуры  $T_{\text{а.г}}^{\text{cp}} = f(T_{\text{ф0}})$  и  $T_{\text{т}}^{\text{cp}} = \varphi_3(T_{\text{а.г}}^{\text{cp}}, T_{\text{т}}^{\text{cp}})$  соответственно, согласно рекомендациям [2–4].

9. В отсутствие опытных данных оценку параметра  $T_{\text{ф0}}$  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  $l - (l + dl)$ :

$$dq_{\text{т}} = dq_{\text{в}}(T) + dq_{\text{н}}, \quad (10)$$

где  $dq_{\text{т}}$  – тепловой поток в направлении поступления реагентной смеси, кВт, образующийся при наличии продольного температурного градиента  $(T_{\text{ф0}} - T_0)$ , К;  $dq_{\text{в}}(T)$  – тепловыделение, кВт, генерирующее продольный температурный градиент  $(T_{\text{ф0}} - T_0)$ , К;  $dq_{\text{н}}$  – теплота, необходимая для нагрева смеси, кВт. Рассматривая пламя, образованное газоздушной смесью, Д.А. Франк-Каменецкий отмечает незначительность времени пребывания последней в зоне реагирования, где тепловыделение является много большим тепловых затрат на нагрев. Выделяя далее последовательные участки нагрева и тепловыделения, он линеаризует продольные профили температуры на каждом из них, а передачу теплоты в направлении поступления реагентной смеси рассматривает в виде условной теплопроводности, заменяя ею сложный механизм лучисто-конвективного теплообмена [20]. Решение задачи по отысканию, в частности, температурного градиента  $(T_{\text{ф0}} - T_0)$  или максимальной температуры факела  $T_{\text{ф0}}$  при этом серьезно упрощается. В промышленных топках выделить или специально организовать самостоятельные последовательные участки нагрева и горения с линейными профилями температуры достаточно сложно. Здесь, как правило, оба процесса протекают параллельно, а на выходе из горелок реализуются профили (1), (3), использование которых также упрощает задачу по отысканию температуры  $T_{\text{ф0}}$ . Однако составляя баланс теплоты для участка факела с границами  $l - (l + dl)$ , необходимо учитывать реальные условия зажигания реагентной смеси и вносить поправки на дополнительные тепловые потери и теплоотвод:

$$dq_{\text{т}} = dq_{\text{в}}(T) + dq_{\text{доп}} - dq_{\text{экр}} - dq_{\text{р}} - dq_{\text{гр}}, \quad (11)$$

где  $dq_{\text{доп}}$  – приток теплоты с подсветочным топливом, кВт;  $dq_{\text{экр}}$  – отвод теплоты к экранам, кВт;  $dq_{\text{р}}$  – 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 (11) можно представить в удобной для инженерных расчетов форме [1]:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{T_{\phi 0} - T_0}{l_{\phi}} F_{\phi} = a_{\phi} Q_{\text{н}}^{\text{р}} B_{\text{р}} + Q_{\text{н доп}}^{\text{р}} B_{\text{р доп}} - \\ - \sigma a_{\text{т}} T_{\phi 0}^4 \sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i F_i)_{\text{а.г}} - c_{\text{рт}} (T_{\phi 0} - T_0) (1 - a_{\phi}) B_{\text{р}} - \\ - c_{\text{рв}} (T_{\phi 0} - T_0) \rho_0 \nu_0 [(1 - a_{\phi}) + (\alpha - 1)] B_{\text{р}} - \\ - c_{\text{рг}} (T_{\phi 0} - T_0) \rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}} r B_{\text{р}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\lambda$  – 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 отсутствие опытных данных ориентировочно по приведенной выше таблице;  $T_{\phi 0}$  – 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  $F_{\phi} = H_{\text{а.г}} A_{\text{т}}$ , м<sup>2</sup>; для топки со встречной компоновкой горелок  $F_{\phi} = H_{\text{а.г}} C_{\text{т}}$ , м<sup>2</sup>, где  $H_{\text{а.г}}$  – высота зоны активного горения, м;  $A_{\text{т}}$  – ширина камеры сгорания, м;  $C_{\text{т}}$  – глубина камеры сгорания, м;  $a_{\phi}$  – 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/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – универсальная постоянная Стефана – Больцмана;  $a_{\text{т}}$  – степень черноты факела, принимается согласно [2, 3];  $\sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i F_i)_{\text{а.г}}$  – комплекс эффективной поверхности тепловосприятия зоны активного горения по нормативной методике теплового расчета, м<sup>2</sup>; член уравнения  $c_{\text{рт}} (T_{\phi 0} - T_0) (1 - a_{\phi}) B_{\text{р}}$  соответствует количеству теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей части топлива  $(1 - a_{\phi}) B_{\text{р}}$ , кг/с; член уравнения  $c_{\text{рв}} (T_{\phi 0} - T_0) \rho_0 \nu_0 \times [(1 - a_{\phi}) + (\alpha - 1)] B_{\text{р}}$  – количество теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей и избыточной части воздуха  $\rho_0 \nu_0 [(1 - a_{\phi}) + (\alpha - 1)] B_{\text{р}}$ , кг/с;  $c_{\text{рг}} (T_{\phi 0} - T_0) \rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}} r B_{\text{р}}$  – 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);  $\nu_0$ ,  $\nu_{\text{г}}$  – объемы воздуха и продуктов сгорания, отнесенные к нормальным условиям и 1 кг топлива, нм<sup>3</sup>/кг;  $\rho_0$ ,  $\rho_{\text{г}}$  – плотность воздуха и продуктов сгорания при средней температуре на участке воспламенения  $T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$  по (2), кг/нм<sup>3</sup>.

9. В отсутствие опытных данных по  $a_{\phi}$  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 [1, 21]. При этом расчетные значения будут отличаться от реально получаемых показателей степени выгорания топлива 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

Рассмотренная модель топочного устройства и методические рекомендации по оценке тепловых характеристик факела в дальнейшем можно расширять как в части конструктивных элементов, так и видов сжигаемого топлива с одновременным пополнением расчетной базы опытными данными [13–15].

### Литература

1. 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.
2. Кузнецов, Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Н.В. Кузнецов. – М.; Л.: Энергия, 1973. – 256 с.
3. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.
4. Митор, В.В. Проектирование топков с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания / В.В. Митор, Ю.Л. Маришак // ВТИ – НПО ЦКТИ. – 1981. – Вып. 42. – 118 с.
5. Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / К.В. Осинцев // Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
6. Осинцев, К.В. Организация низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли на котлах / К.В. Осинцев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 12. – С. 15–19.
7. 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. – Т. 1. – С. 379–382.

8. Осинцев, К.В. Переход к низкотемпературному сжиганию топлива на котлах ТЭЦ г. Бишкек / К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2012. – № 8. – С. 1–6.

9. Сжигание природного газа в слабоэкранированной топке котла Бабкок-Вилькоккс с подовыми горелками / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, М.П. Сухарев и др. // *Электрические станции*. – 2010. – № 6. – С. 8–14.

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

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

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. 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.

16. 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.

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 отдельным тангенциальным вводом реагентов в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов и др. // *Электрические станции*. – 1994. – № 7. – С. 12–17.

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

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. – 210 с.

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

*Поступила в редакцию 31 марта 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Power Engineering”**  
**2014, vol. 14, no. 3, pp. 5–14**

---

## COMPUTATIONAL MODEL OF FURNACE UNIT WITH VARIOUS LAYOUTS OF BURNERS

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

Previously offered computational model of furnace unit with front-face layout of burners including active combustion and cooling zones with the former being additionally separated into ignition and burning areas at balanced heat-sink with conditionally constant flame temperature has found a use in development and adjustment of new fuel combustion systems as well as in reconstruction of existing ones. The paper considers model



of furnace unit with bottom-ash removal and different schemes of wall layout of burners; the model is used for evaluation of thermal characteristics of flame at design and engineering works, adjustment and studies of boilers. The paper offers technique of model use. Submitted offers allow of enhancing safety of system introducing reactant and regulated inert flows into furnace, minimizing slagging at burning of solid slagging fuels, prolonging interrepair life of boiler equipment. Use of developed model and calculating technique for thermal characteristics of flame allows of setting effective performance operating and constructive parameters for system introducing reactant and regulated inert flows into furnace, additionally providing enhanced safety of boiler elements at conversion of units from one kind of fuel to another. Evaluation technique for thermal characteristics of flame using two-zone model of furnace cannot be regarded as complete with full coverage of possible technical variants of layout schemes and constructions of burners. With that, technique can be used as basic one at optimization of new types of furnaces and burners; it also allows of filling up computational base with experimental data that could be further used for safety engineering estimate of elements in such units.

*Keywords: boiler, burner, model, technique.*

### References

1. 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.)
2. *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.
3. *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.
4. Mitor V.V., Marshak Yu.L. *Proektirovanie topok s tverdyim shlakoudaleniem (dopolnenie k normativnomu metodu teplovogo rascheta kotelnikh agregatov)* [Designing Furnaces with Dry-Ash Removal (a Supplement to the Standard Method for Thermal Design of Boiler Units: Guidelines)]. Leningrad, NPO TsKTI, 1981, iss. 42, 118 p.
5. 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.)
6. Osintsev K.V. [Organization of Low-Temperature Flaring of Coal Dust on Boilers]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Mechanical Engineering], 2010, no. 12, pp. 15–19. (in Russ.)
7. Osintsev K.V. [Changeover to Low-Temperature Combustion of Fuel in the Boilers at Cogeneration Stations in Bishkek]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2012, no. 59, pp. 598–603. (in Russ.)
8. Osintsev K.V., Osintsev V. V., Sukharev M. P. et al. [Combustion of Natural Gas in the Babcock & Wilcox Boiler Furnace with Low-Shielding Pipes in Bottom Burners]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 2010, no. 6, pp. 8–14. (in Russ.)
9. 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.)
10. 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.)
11. 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.)
12. *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.
13. 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.)
14. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Sukharev M.P., Toropov E.V. [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.)
15. 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.)
16. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Gigin V.Ya. et al. [Shifting a BKZ-160 Boiler for Using a Staged Fuel Combustion Technology]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1993, no. 3, pp. 25–29. (in Russ.)

17. Osintsev V.V., Dzhundubaev A.K., Gigin V.Ya. et al. [Shifting a BKZ-160 Boiler for Using a Staged Fuel 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. [Shifting a BKZ-210-140F Boiler of CCHP-2 for Using a Natural Gas Combustion Technology with Separate Tangential Inlet of the Reagents]. *Elektricheskie Stantsii* [Electric Power Plants], 1994, no. 7, pp. 12–17. (in Russ.)
19. Osintsev V.V. [Aerodynamics and Temperature Fields of Flues Coal-fired Boilers]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 1989, no. 11, pp. 46–49. (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 31 March 2014*