

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.181

СЖИГАНИЕ РАЗЛИЧНОГО ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ФАКЕЛЕ

К.В. Осинцев

г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет

COMBUSTION OF THE SOLID FUEL WITH DIFFERENT THERMAL CHARACTERISTICS IN LOW-TEMPERATURE FLAME

K.V. Osintsev

Chelyabinsk, South Ural State University

Рассмотрены актуальные вопросы управления тепловой структурой и газодинамикой факела котлов с фронтальным расположением горелок, оснащенных многофункциональными горелками при изменении вида поставляемого для сжигания топлива. Выбор рабочих характеристик топливоподачи и пылеприготовления при подаче на котел нового вида топлива осуществляется по предварительной расчетной оценке степени выгорания и нормативным параметрам факела с последующим опытным сжиганием, наладкой и режимными испытаниями котла.

Ключевые слова: котел, горелка, управление тепловой структурой факела.

Important issues of controlling of thermal structure and gas dynamics of the flame in frontal burner boilers are analyzed in the article. The choice of working characteristics of coal-conveying plant and coal-pulverization in case of supplying the fuel of a new kind to the boiler is realized by preliminary estimation of the degree of burning off and specified flame parameters with the following experimental burning, maintenance and mode test of boilers.

Keywords: boiler, burner, controlling of flame thermal structure.

В процессе освоения факельной технологии сжигания топлива возникли две основные ветви ее развития: высокотемпературное горение, при котором шлак из топок выводят в жидком виде, и горение с пониженной температурой факела, при котором вывод шлака осуществляют в твердом виде. В соответствии с этим появились топки с жидким и твердым шлакоудалением. Топки с жидким шлакоудалением могут быть оборудованы несколькими камерами (предтопками) для расплавления и вывода шлака либо иметь одну камеру с летками для вывода шлака в подовом перекрытии и настенные горелки. Топки с твердым удалением шлака оснащены «холодными воронками» – экранированными скатами в поду для охлаждения удаляемых крупных частиц золы (как правило, спекшихся из более мелких частиц конгломератов) и горелками, размещаемыми на стенах.

Уже в 70–80 гг. прошлого столетия при разработках новых проектов ТЭС, рассчитанных на сжигание топлива с высоким выходом летучих

($V^t > 25-28\%$), предпочтение стали отдавать топкам с твердым шлакоудалением, поскольку они имели менее проблемную технологию вывода шлака из-под холодных воронок, более эффективный теплоотвод от факела к экранам, пониженные значения температуры факела («низкотемпературное» факельное сжигание) [1, 2] в зоне активного горения и концентрации NO_x в продуктах сгорания, а также умеренные тепловые потоки в направлении горелочных амбразур. Топки с жидким шлакоудалением, имеющие высокое тепловое напряжение и повышенный уровень температуры в зоне активного горения, по-прежнему предпочтительны для сжигания топлив с низким выходом летучих, особенно антрацитов [3].

Перевод существующих котлоагрегатов на низкотемпературное горение связан с капитальными затратами. На кафедре промышленной теплоэнергетики ЮУрГУ разработана малозатратная технология, основанная на организации рассредоточенного ввода реагентов в топку. Такой ввод мо-

жет быть выполнен различными способами [4, 5]. На котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 реагентные потоки рассредотачивают через индивидуальные каналы многофункциональных горелок [6, 7], организуя прогрев, зажигание и начальное развитие экзотермических реакций в потоках топливовоздушной смеси при неполном количестве окислителя, а также последующее поддержание горения плавной приточно-диффузионной кислородной подпиткой из потоков вторичного воздуха. В сравнении с факелом обычной топливовоздушной смеси здесь темп выделения и накопления теплоты, максимальные теплосодержание и температура имеют пониженные значения, которые не достигают, в частности, значений тех же параметров, необходимых для расплавления частиц сопутствующей породы, вводимых в топку с потоками топливной пыли. Это обуславливает снижение загрязнения элементов топок и горелок, их шлакование.

При растягивании по длине l факела процесс экзотермического реагирования смещается в зону с максимальными теплонакоплением, теплосодержанием и температурой от среза горелок с $l=0$ до отметки $l_{\phi} = 1,5-2,5$ м, что достаточно для уменьшения теплового потока в направлении горелочных амбразур, снижения их теплооблучаемости, активности терморазрушений и увеличения срока службы. Помимо организации и поддержания пониженного температурного уровня в факеле горелочные устройства этого типа адаптированы к топливу переменного состава [8–10].

На схеме (см. рисунок) показано, что топочный факел, сформированный многофункциональными горелками, условно можно разделить на участки воспламенения, максимального теплосодержания и охлаждения, а в качестве основных контролируемых параметров использовать принятые в топочной технике температуру и степень выгорания топлива в зоне максимального теплосодержания T_{ϕ} , К; a_{ϕ} и в выходном сечении топки T_{τ}'' , К; a_{τ} . Ответственным за состояние факела в топке на всех участках являются его начальные параметры, определяющие активность процесса воспламенения; последний протекает в границах участка, начинающегося от среза горелок на отметке $l = 0$ м, где температура $T = T_0$, К; степень выгорания топлива $a = 0$, а заканчивается на отметке $l = l_{\phi}$, м, где температура $T = T_{\phi}$, К; степень выгорания топлива $a = a_{\phi}$.

Однако при переходах от одного вида топлива к другому с отличными теплофизическими характеристиками параметры факела меняются, что требует их корректировки путем перенастройки режимов работы топливopитательных систем, мельничного и тягодутьевого оборудования котлов. Подобная перенастройка осуществляется по определенному алгоритму, который в зависимости от используемого оборудования и вида топлива на различных ТЭС может иметь свои особенности.

Каждому виду топлива соответствуют собственные значения l_{ϕ} , a_{ϕ} , T_{ϕ} .

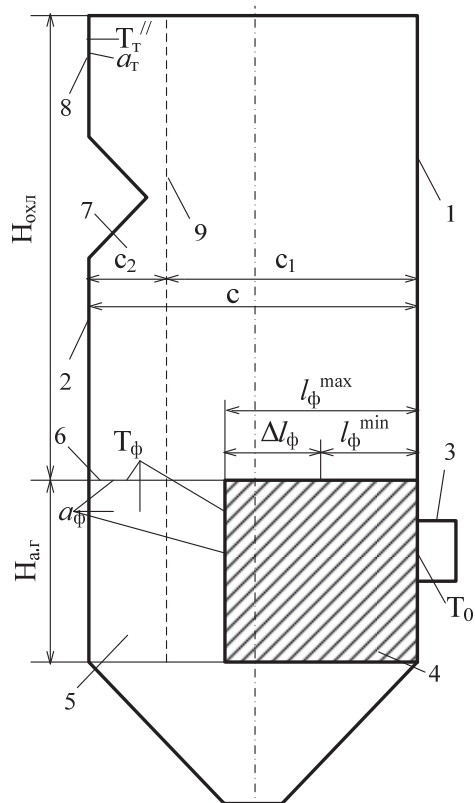


Схема выделения зон и участков развития факела в топке с фронтальной компоновкой многофункциональных горелок:

1, 2 – фронтальная и задняя стены топки, 3 – горелки, 4 – участок воспламенения, 5 – участок максимального теплосодержания, 6 – выходное сечение участка максимального теплосодержания, 7 – участок охлаждения факела, 8 – выходное сечение топки и участка охлаждения, 9 – расчетная плоскость развития неравномерности скорости и температуры факела на участке охлаждения

При обработке результатов зондирования факела на участке воспламенения получены универсальные зависимости для всех видов топливного реагента:

$$dq_{\tau} = -\frac{d}{dl} \left(\lambda \frac{dT}{dl} F \right) dl = -\frac{d}{d\xi} \left[\frac{1}{m} \frac{12\xi^2 - 24\xi^3 + 12\xi^4}{(6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1-1/m}} \lambda \frac{T_{\phi} - T_0}{l_{\phi}} F \right] d\xi, \quad (1)$$

где dq_{τ} – поток теплоты в направлении поступления топливовоздушной смеси; $\xi = l/l_{\phi}$ – относительная длина факела, причем $\xi=0$ на срезе горелки, а $\xi=1,0$ на длине $l=l_{\phi}$; $m \approx 5$ для пыли бурого угля и природного газа.

В развернутом виде (1) записывается следующим образом:

$$dq_{\tau} = \frac{d}{d\xi} a_{\phi} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n} Q_0 B_0 d\xi + \frac{d}{d\xi} Q_{\text{доп}} B_{\text{доп}} d\xi - \frac{d}{d\xi} \left(\sum_{i=1}^n \Psi_i H_i \right) a_{\tau} \sigma_0 l_{\phi} T_{\text{ср}}^4 d\xi - \frac{d}{d\xi} (2500W^p + c_{pW} \times \Delta t_W \times W^p + c_{pH} \times \Delta t_H \times W^p) B_0 d\xi - \frac{d}{d\xi} (c_{pA} \times \Delta t_A \times A^c) B_0 d\xi - \frac{d}{d\xi} (V^c \times c_{pV} + (1 - V^c) \times c_{pK} + \alpha \times V^0 \times c_{pB}) B_0 \times \Delta t' d\xi - \frac{d}{d\xi} (I_{\phi} - I_0) \times r \times B_p d\xi. \quad (2)$$

Здесь λ – условный коэффициент теплопроводности, кВт/(м·К); $T=f(x, y, z) \approx \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i)$ – текущая усредненная в поперечных направлениях температура среды, К; x – текущая продольная координата факела, м; F – поперечное сечение факела, м²; Q_0 – теплота сгорания на сухую массу, кДж/кг, $Q_0 = Q_{\text{л}} \cdot V^c + Q_{\text{к}} \cdot (1 - V^c)$, где $Q_{\text{л}}$, $Q_{\text{к}}$ – теплоты сгорания летучих и обеззоленного коксового остатка, кДж/кг, V^c – содержание летучих; B_0 – расход топлива, кг/с; B_p – расчетный расход топлива, кг/с; $Q_{\text{доп}}$, $B_{\text{доп}}$ – теплота сгорания, кДж/м³, и расход дополнительного подсветочного топлива, м³/с; a_{τ} – степень черноты; $T_{\text{ср}}$ – средняя температура факела на участке воспламенения, К, может быть определена из выражения

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} T dl = \frac{T_0}{\xi_2 - \xi_1} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} + \frac{T_{\phi} - T_0}{\xi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m} d\xi$$

(применительно к пылевому и газовому факелу $T_{\text{ср}} \approx 0,925 T_{\phi}$); $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) – универсальная постоянная Стефана–Больцмана (коэффициент излучения абсолютно черного тела);

$$\sum_{i=1}^n \Psi_i H_i = \Psi_{\text{стен}} H_{\text{стен}} + \Psi_{\text{верх}} H_{\text{верх}} + \Psi_{\text{низ}} H_{\text{низ}} -$$

условный параметр переизлучения, где $H_{\text{стен}}$, $H_{\text{верх}}$, $H_{\text{низ}}$ – высота стен, ограничивающих горизонтальный участок активного горения в топке, ширина верхнего сечения участка активного горения и ширина нижнего сечения того же участка, причем $H_{\text{низ}}$ определяется с учетом лучистой поверхности холодной воронки, м, $\Psi_{\text{стен}}$, $\Psi_{\text{верх}}$, $\Psi_{\text{низ}}$ – степени отвода теплоты из зоны активного горения через боковые стены, верх и низ топки, которые определяются по приближенным формулам: $\Psi_{\text{стен}} = (T_{\text{ср}}^4 - T_{\text{стен}}^4) / T_{\text{ср}}^4$; $\Psi_{\text{верх}} = (T_{\text{ср}}^4 - T_{\text{верх}}^4) / T_{\text{ср}}^4$; $\Psi_{\text{низ}} = (T_{\text{ср}}^4 - T_{\text{низ}}^4) / T_{\text{ср}}^4$; $T_{\text{стен}}$, $T_{\text{верх}}$, $T_{\text{низ}}$ – температуры стен, верхнего и нижнего сечений участка воспламенения, К; W^p – рабочая влажность; c_{pW} , c_{pH} – средние теплоемкости воды и паров газовой смеси, кДж/(кг·К); $\Delta t_W = T_{\text{кип}} - T_W$, К; $\Delta t_H = T - T_{\text{кип}}$, К; A^c – зольность на сухую массу топлива; c_{pA} – теп-

лоемкость золы в интервале температур T_0 и текущей температуры факела, кДж/(кг·К); $\Delta t_A = T - T_0$, К; V^0 – удельный объем воздуха при средней температуре факела на участке воспламенения, м³/кг; c_{pV} , c_{pK} , c_{pB} – теплоемкости летучих, коксового обеззоленного остатка, воздуха в интервале температур T_0 и $T_{\text{ср}}$, кДж/(кг·К); $\Delta t' = T_{\text{ср}} - T_0$, К.

Параметр $a=f(R_{90})$, где R_{90} – условный показатель тонины помола пыли; в отсутствии опытных значений, полученных на котле (например, при настройке оборудования для проведения опытного сжигания топлива) может быть использована методика оценки $a=f(R_{90})$ на базе экспериментальных данных В.И. Бабия, Ю.Ф. Куваева для одиночных частиц [11].

На участке максимального теплосодержания принимается постоянство значений энтальпии, температуры и степени выгорания факела ($I_{\phi} \approx \text{const}$; $T_{\phi} \approx \text{const}$; $a_{\phi} \approx \text{const}$) по каждому из i -го вида топлива.

На участке охлаждения факел отдает свою теплоту топочным экранам; здесь же происходит дожигание топлива с изменением параметров T_{ϕ} , К и a_{ϕ} до $T_{\text{т}}''$, К и $a_{\text{т}}$ в выходном окне топки. Эти изменения могут быть учтены балансовыми уравнениями теплоты [12], либо в первом приближении оценены экспериментальными зависимостями.

Включению в работу стандартного блока регулирования параметрами котла предваряет выбор (i -го) топлива и соответствующей ему режимной карты. Все параметры этой карты получены опытным путем при наладке, режимных испытаниях, обрабатываются системой управления до смены другим видом топлива [9].

Выводы

1. Алгоритм управления топочным факелом позволяет варьировать виды топлива без дорогостоящих перенастроек вспомогательного оборудования.

2. Выбор рабочих характеристик топливopдачи и пылеприготовления при подаче на котел нового вида топлива осуществляется по предварительной расчетной оценке степени выгорания и нормативным параметрам факела с последующим опытным сжиганием, наладкой и режимными испытаниями котла.

3. Возможный переход к горелочным устройствам и топливным системам другого типа потребует корректировки рассмотренного в статье алгоритма.

Литература

- Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / К.В. Осинцев // Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 13–17.
- Осинцев, К.В. Организация низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли на

котлах / К.В. Осинцев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 12. – С. 15–19.

3. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

4. Перевод котла БКЗ-160-140Ф на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1993. – № 3. – С. 25–29.

5. 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.

6. Пат. 2306484 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 17/00, F 23 C 1/12. Способ работы многофункциональной горелки / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, М.П. Сухарев, Г.К. Криницын, Б.А. Мудрых, В.В. Стародубцев, К.В. Осинцев. – №2006121067/06; заявл. 13.06.06; опубл. 20.09.2007, Бюл. № 26. – 6 с.

7. Пат. 2309332 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 17/00. Многофункциональная горелка / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, М.П. Сухарев, Г.К. Криницын, Б.А. Мудрых, В.В. Стародубцев, К.В. Осин-

цев. – № 2006121028/06; заявл. 13.06.06; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. – 9 с.

8. 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.

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. Осинцев, К.В. Организация факельного сжигания низкосортного твердого топлива и природного газа в топках котлов с фронтальной компоновкой горелок: монография / К.В. Осинцев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, ООО «Издательство РЕКПОЛ», 2010. – 227 с.

11. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 210 с.

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

Поступила в редакцию 19.09.2011 г.

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

Osintsev Konstantin Vladimirovich – Cand. Sc. (Engineering), an assistant professor of the Department of Heat-and-Power Engineering of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: flame combustion. Tel.: 8 (351) 267-93-95.