

МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ФАКЕЛЬНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОТНОСИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.Ю. Кулешов*, Е.И. Муслимов**

* Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, o-yu-kul@yandex.ru

** Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, post.pt@yandex.ru

Аннотация. Предложены математическая модель и методика расчета характеристик газовых факелов, которые приближенно на основе принципа относительного моделирования учитывают закономерности массопереноса в факеле и позволяют эффективно определять длину и динамику выгорания (тепловыделения) диффузионных и смешанных факелов в условиях промышленных печей. Модель может быть использована в сочетании с зональным методом численного расчета сложного теплообмена в промышленных печах.

Ключевые слова: газовые факела, промышленные печи, горелки, условия сжигания, диффузионное горение, относительное моделирование.

METHOD OF CALCULATING CHARACTERISTICS OF FLAME BURNING GASEOUS FUELS IN INDUSTRIAL FURNACES ON BASIS OF THE PRINCIPLE OF RELATIVE SIMULATION

O.Yu. Kuleshov*, E.I. Muslimov**

* Yuri Gagarin state technical university of Saratov,
Russia, Saratov, o-yu-kul@yandex.ru

** Yuri Gagarin state technical university of Saratov,
Russia, Saratov, post.pt@yandex.ru

Abstract. The mathematical model and calculational technique of gaseous flames characteristics are proposed. They approximately in base of relatively modeling principle take into account mechanisms of mass transfer in flame and allow effectively to determine length and burn out (heat release) dynamics of diffusional and combined flames in industrial furnace conditions. The model may be used in combination with zoning method of numerical calculation of radiative-convective heat transfer in industrial furnace.

Keywords: gaseous flames, industrial furnace, burners, burning conditions, diffusional combustion, relatively modeling.

Сжигание газа в длинных диффузионных и диффузионно-кинетических (смешанных) факелах является одним из основных теплотехнических принципов, реализуемых в промышленных печах для обеспечения равномерности теплоподвода в рабочей камере. Для расчетного анализа детальных характеристик сложного теплообмена в рабочей камере пламенных печей в инженерной практике применяются различные модификации численного зонального метода [1]. Зональный метод предполагает использование исходных данных по длине и динамике выгорания топлива (тепловыделения) в факеле, которые, как правило, задаются на основе экспериментальных данных и их обобщений. Однако эмпирический подход к описанию характеристик факелов в промышленных печах не является эффективным из-за сложности физических процессов, многообразия горелочных устройств и условий сжигания топлива. Поэтому актуальной является разработка достаточно простых в математическом отношении, но в то же время эффективных и универсальных моделей и методик расчета факелов для использования в качестве замыкающих соотношений для задач сложного теплообмена в печах.

В данной работе предложены математическая модель и методика расчета характеристик диффузионных и смешанных газовых факелов в промышленных печах с различными видами горелок, приближенно учитывающие закономерности диффузи-

онных процессов в спутном потоке горючего и окислителя и окончательно уточняемые по экспериментальным данным. Это делает методику достаточно общей и универсальной.

Методика расчета основана на применении принципа относительного моделирования, когда за основу берется длина и кривая выгорания свободного диффузионного газового факела (вне печи) при тех же основных условиях и вводятся поправочные функции, каждая из которых учитывает одно из дополнительных условий, определяющих процесс факельного горения в промышленных печах. При этом поправочные функции зависят от отношений определяющих параметров для ограниченного внутривспечного и свободного факельного горения. Последнее чрезвычайно важно, поскольку эти относительные параметры слабо изменяются по длине расчетного внутривспечного факела и могут служить характеристиками факельного процесса в целом, что значительно упрощает задачу без существенной потери точности.

Основными условиями факельного процесса, которые должны быть одинаковыми как внутри печи, так и во вне, являются: состав топливного газа; форма и размеры горелочного отверстия (круглая или щелевая); расход и скорость истечения газа через горелочное сопло. При этом предполагается, что свободный факел развивается в неограниченной среде окислителя (воздуха).

Анализ процессов факельного сжигания газообразного топлива в промышленных печах с различными видами горелок позволил установить следующие дополнительные условия горения и соответствующие им поправочные функции f_x : 1) стесненность факела, $f_{огр}$; 2) спутность потоков горючего и окислителя, включая значение коэффициента избытка воздуха, f_m ; 3) крутка и дополнительная турбулизация факела за счет установки в горелках завихрителей, f_{Ω} ; 4) настильность факела, f_w ; 5) частичное предварительное смешение горючего газа с воздухом, $f_{см}$.

Дополнительные условия горения и соответствующие им функции 1-4 учитывают граничные условия развития диффузионного факела, функция 5 учитывает начальные условия. Если какое-либо из дополнительных условий развития факела отсутствует, то соответствующая поправочная функция $f_x=1$.

В отличие от диффузионного смешанный факел, образующийся при частичном предварительном смешении топливного газа с воздухом, имеет два фронта горения – кинетический (короткий, расположенный вблизи среза горелочного сопла) и диффузионный (длинный, в котором происходит догорание топлива). Поэтому горение на основном участке смешанного факела $x > L_{нач}$ по сути является диффузионным с меньшей концентрацией горючих компонентов в газовой струе и интенсивным тепловыделением на начальном участке за счет горения в кинетическом фронте.

В соответствии с развиваемым подходом длина произвольного факела в условиях промышленной печи выразится в виде

$$L_{\phi} = L_{св.ф} \cdot f_{огр} \cdot f_m \cdot f_{\Omega} \cdot f_w \cdot f_{см} \quad (1)$$

Длина свободного диффузионного факела $L_{св.ф}$ имеет достаточно простое выражение. Экспериментально установлено, что длина диффузионного факела пропорциональна его стехиометрической длине $L_{сх}$, на которой подсасывается теоретически необходимое количество воздуха, и приведенному критерию Фруда Fr_{ϕ} или Архимеда Ar_{ϕ} (при воздействии массовых сил на формирование факела) и может быть вычислена по формуле

$$\frac{L_{св.ф}}{d_r} = C Ar_{\phi}^{0,17} \left(\frac{L_{сх}}{d_r} \right)^{0,59} \quad (2)$$

$$Ar_{\phi} = 3,3 \frac{u_r^2 \rho_r^0}{g d_r \rho_c^0} = 3,3 Fr_{\phi} \frac{\rho_r^0}{\rho_c^0}, \quad (3)$$

где C – константа, для аксиального факела равная $C=1,74$; d_r – диаметр сопла горелки, в случае некруглого сечения – эквивалентный диаметр; u_r – скорость истечения газа из сопла горелки; g – ускорение свободного падения; ρ_r^0 , ρ_c^0 – начальные плотности горючего газа и среды, в которую он истекает.

Стехиометрическая длина факела определяется по известной формуле

$$\frac{L_{cx}}{d_r} = 5,7 \sqrt{\left[1 + \frac{0,63(\theta-1)}{\theta_p V_0 + 1}\right] \frac{\psi}{\theta}} \times (1 + \theta_p V_0), \quad (4)$$

где $\theta_p = \rho_p^0 / \rho_r^0$; $\theta = \theta_p (273 + t_r^0) / (273 + t_b^0)$; $\psi = 2,8$;

V_0 – теоретический объем воздуха на горение; ρ_r^0 , ρ_b^0 и t_r^0 , t_b^0 – начальные плотности и температуры газа и воздуха.

Вид поправочных функций в выражении (1) найдем исходя из теоретических представлений о процессе массопереноса в турбулентном диффузионном факеле.

Количество газа, кг/с, полностью сгорающего в свободном диффузионном и ограниченном внутривулканном факелах, одинаково при одинаковом расходе газа через горелки по условию задачи, т.е.

$$M_r = const. \quad (5)$$

Это же количество газа, кг/с, диффундирует из струи к фронту горения

$$M_r = \frac{D}{\delta_{\phi}} \Delta c F_{\phi} = \frac{D}{\delta_{\phi}} c_f L_{\phi} \Pi_{\phi}, \quad (6)$$

где D – коэффициент диффузии; δ_{ϕ} – характерная толщина зоны массопереноса в факеле, для коаксиального факела $\delta_{\phi} = d_{\phi}/2$; $\Delta c = c_f$ – средняя разность концентраций компонента в струе c_f и во фронте горения $c_{\phi p} = 0$; $F_{\phi} = L_{\phi} \Pi_{\phi}$ – площадь поверхности фронта горения; Π_{ϕ} – характерный периметр фронта горения.

Тогда на основании (5), (6) можно записать выражение для относительной длины факела, которая в случае учета только одного из дополнительных условий горения представляет собой поправочную функцию $f_x = f_{огр}, f_m, f_{\Omega}, f_w, f_{см}$:

$$f_x = \frac{L_{\phi}}{L_{св.ф}} = \frac{D_{\phi}}{D_{св.ф}} \cdot \frac{\delta_{св.ф}}{\delta_{\phi}} \cdot \frac{c_{\phi}}{c_{св.ф}} \cdot \frac{\Pi_{\phi}}{\Pi_{св.ф}}. \quad (7)$$

Коэффициент диффузии в поперечном направлении факела определяется турбулентной составляющей, которая пропорциональна турбулентной вязкости

$$D_{\phi} \approx \varepsilon_{\tau}. \quad (8)$$

Согласно гипотезе Прандтля

$$\varepsilon_{\tau} = l^2 (du/dy) \text{ или в среднем } \varepsilon_{\tau} = l_{cp}^2 (du/dy)_{max}, \quad (9)$$

где ε_{τ} – турбулентная вязкость; l и l_{cp} – длины пути турбулентного смешения – локальная и средняя; du/dy и $(du/dy)_{max}$ – градиенты скорости в поперечном направлении потока – локальный и максимальный.

На основании (8), (9) выражение (7) можно переписать в виде

$$f_x = \frac{L_{\phi}}{L_{св.ф}} = \left(\frac{l_{\phi}}{l_{св.ф}} \right)_{cp}^2 \cdot \frac{(du/dy)_{max \phi}}{(du/dy)_{max \text{ св.ф}}} \cdot \frac{\delta_{св.ф}}{\delta_{\phi}} \cdot \frac{c_{\phi}}{c_{св.ф}} \cdot \frac{\Pi_{\phi}}{\Pi_{св.ф}}. \quad (10)$$

В формуле (10) относительные параметры, которые не могут быть определены однозначно, берутся как характерные или средние величины для основного участка факелов.

Последняя формула представляет собой общее выражение для поправочной функции $f_x = f_{огр}, f_m, f_{\Omega}, f_w, f_{см}$, которое конкретизируется для каждого случая путем учета относительного изменения определяющих параметров факельного процесса, входящих в (10), на основе теории турбулентных струй [2] и уточняется по экспериментальным данным путем введения корреляционных коэффициентов. Проведенные предварительные оценки показывают хорошее качественное совпадение теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных на огневых стендах [3].

При определении динамики выгорания (тепловыделения) газового факела используется качественная схожесть кривых изменения химического недожога топлива вдоль диффузионных факелов при различных условиях сжигания, а также предположение о приближенной автомодельности факельных процессов на основном участке факела $x > L_{нач}$. В качестве нормирующего выступает параметр, являющийся производным от общей длины факела L_{ϕ} , рассмотренной ранее.

Выгорание топлива в i -ом сечении факела χ_i оценивается по величине химического недожога топлива q_{3i} и связано с ним простым выражением

$$\chi_i = 1 - q_{3i} \quad (11)$$

Распределение среднего в сечении химического недожога вдоль диффузионного факела промышленной горелки может быть определено по формуле

$$\frac{q_3}{q_{03}} = \exp \left[-7.41 \left(\frac{x + L_{нач}}{L_{\phi}} \right)^{2.73} \right], \quad (12)$$

где q_3 и q_{03} – средний химический недожог топлива в рассматриваемом сечении факела с координатой x и на срезе горелки; $L_{нач}$ – длина начального участка факела.

Тепловыделение между двумя сечениями факела i и $i+1$ рассчитывается по формуле

$$Q_{i,i+1} = G_{г} Q_{н}^p (\chi_{i+1} - \chi_i), \quad (13)$$

где $G_{г}$ – расход газа через горелку, кг/с;

Таким образом, предложены математическая модель и методика расчета характеристик газовых факелов, которые на основе принципа относительного моделирования учитывают закономерности массопереноса в факеле, являясь при этом достаточно простыми в математическом отношении. Методика позволяет эффективно определять длину и динамику выгорания (тепловыделения) диффузионных и смешанных факелов в промышленных печах, отличающихся значительным многообразием горелочных устройств и условий сжигания. Модель может быть использована в сочетании с зональным методом численного расчета сложного теплообмена в промышленных печах.

Библиографический список

1. Блох А.Г., Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков Теплообмен излучением. М: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. М.: Наука, 1984. 716 с.
3. Седелкин В.М. Исследование и разработка методов расчета теплообмена в трубчатых печах газовой и нефтехимической промышленности: дис. ... докт. техн. наук. Саратов, 1982.