

охлаждения принимается постоянной на каждом из этапов. Точность расчетов тем выше, чем более дробно по этапам расчленяется процесс, однако при этом резко увеличивается трудоемкость расчета. Поэтому представляет интерес построение номограмм с их последующим применением для графоаналитического расчета процесса затвердевания. Построение номограмм осуществлялось с помощью ЭВМ "Минск - 22".

Результаты расчета использованы при проектировании линии горизонтального непрерывного литья чугуна на Руставском заводе "Центролит".

Л.Е. Ровин, А.П. Михалевич, К.Гершниц

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ДОЖИГАНИЯ ВАГРАНОЧНЫХ ГАЗОВ

Процесс дожигания газов в трубе вагранки зависит от ряда факторов: температуры, состава и запыленности газов на выходе из слоя шихты, скорости (удельного расхода) и масштаба турбулентности потока, интенсивности отвода тепла через открытое завалочное окно, частоты и способа завалки шихты, диаметра и высоты трубы, а также коэффициента разбавления газов за счет подсоса. В ходе плавки параметры ваграночных газов колеблются в широких пределах, поэтому без учета кинетических характеристик горения любые схемы расчета, используемые в печной теплотехнике, дают искаженные результаты, описывающие реальные процессы весьма приближенно.

Задачей исследования явилось отыскание принципиально возможных уровней процесса, определение количественного влияния на устойчивость режима горения каждого из перечисленных выше факторов, а затем разработка рекомендаций по расчету и проектированию узлов дожигания. Использование для этой цели лабораторных моделей затруднительно из-за сильного влияния масштабного фактора и большого числа переменных.

В связи с этим была сделана попытка математического моделирования процесса горения газов в трубе вагранки с использованием ЭВМ "Минск-82". Рассчитывались два варианта процесса: адиабатический и при сложном теплообмене с отводом тепла излучением и конвекцией. Первый соответствует работе закрытым завалочным окном, когда потерей тепла через футерованные стенки можно пренебречь.

Точное задание краевых условий с учетом пространственного распределения всех параметров в зоне горения не представлялось возможным. Поэтому для исследований использована одномерная линейная модель: в расчет вводились средние по сечению шахты значения переменных при сохранении единственной пространственной координаты — высоты трубы выработки. Отдельные компоненты дополнительно просчитывались по методу конечных разностей, т.е. по "нуль-размерной" схеме, что отвечает состоянию газовой смеси при полном предварительном перемешивании.

Анализ процесса проводился на основе положений тепловой теории горения (1) и макрохимической кинетики (2), что позволило учесть, как кинетические соотношения, так и процессы теплопереноса. В качестве основного уравнения использовалось равенство количества выделяющегося тепла в процессе реакции и отводимого с продуктами горения и в окружающую среду. Для одно- и нуль-размерной схемы можно соответственно записать:

$$\frac{d\varphi}{d\tau_{\text{ПК}}} = \frac{1 - \varphi}{\tau_{\text{ДК}} + e^{1/\theta}} \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau_{\text{ПК}}} = \frac{1}{\nu} \left[\frac{d\theta}{d\tau_{\text{ПК}}} - \beta(\theta_{\text{М}}^4 - \theta^4) \right], \quad (2)$$

где $\varphi = 1 - \frac{c}{c_0}$ — коэффициент полноты сгорания; $\tau_{\text{ПК}} = \frac{\tau_{\text{П}}}{\tau_{\text{К}}}$, $\tau_{\text{ДК}} = \frac{\tau_{\text{Д}}}{\tau_{\text{К}}}$ — безразмерные время пребывания и время диффузии; $\tau_{\text{П}} = \frac{x_0}{\omega_{\text{СР}}}$ — время пребывания смеси в исследуемой зоне, равное отношению длины пути к средней скорости; $\tau_{\text{К}} = \frac{1}{k_0}$ — кинетическое время, обратное по величине константе скорости химической реакции; $\tau_{\text{Д}} \approx \frac{1}{\alpha_{\text{Д}}}$ — время диффузии (перемешивания), обратное по величине коэффициенту диффузионного обмена. В случае крупномасштабной турбулент-

ности, что обычно имеет место в трубе вагранки, $\alpha_d = f(Re)(Pr)$. В соответствии с этим для данных условий

$$\alpha_d = \frac{\alpha_k}{c_p} ; \quad (3)$$

$\gamma = \frac{E^3 q c_o}{R^3 k_o c_p}$ — приведенная теплоемкость смеси (для адиабатической задачи); $\beta = \frac{E^3 c'_{пр}}{R^3 k_o c_p}$ — приведенный безразмерный коэффициент теплоотдачи излучением; $\Theta_o = \frac{RT_o}{E}$, $\Theta = \frac{RT}{E}$ — безразмерные начальная и текущая температуры газовой смеси; $\Theta_M = \frac{RT_M}{E}$ — максимальная (калориметрическая) безразмерная температура продуктов горения;

$$c'_{пр} = c_{пр} + \alpha_k \frac{T_M - T_o}{T_M^4 - T_o^4} ; \quad (4)$$

$c_{пр}$ — приведенный коэффициент излучения; α_k — коэффициент конвективного теплообмена.

Расчет производится по принципиальной схеме, предложенной в работе (1), путем приближенного расчленения процесса на две стадии. Для 1-й зоны

$$\frac{d\varphi}{d\tau_{пк}} = 0 \text{ и } \frac{d\Theta}{d\tau_{пк}} = \beta (\Theta_M^4 - \Theta^4). \quad (5)$$

Отсюда

$$\tau_{пк} = \frac{1}{\beta} \int_{\Theta_o}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta_M^4 - \Theta^4} = \frac{0,25}{\beta \Theta_M^3} \left[\ln \frac{(\Theta_M + \Theta)(\Theta_M - \Theta_o)}{(\Theta_M - \Theta)(\Theta_M + \Theta_o)} + 2 (\arctg \frac{\Theta}{\Theta_M} - \arctg \frac{\Theta_o}{\Theta_M}) \right]. \quad (6)$$

Для того чтобы рассчитать изменение температуры в смеси по высоте трубы, необходимо знать начальную скорость газового потока. Тогда

$$\omega_{\text{ср}} = \omega_0 \frac{T_0 + T_M}{2T_0} = \omega_0 \frac{1 + \frac{\Theta_M}{\Theta_0}}{2}; \quad (7)$$

$$\xi = \frac{k_0 x}{\omega_0}; \quad d\xi = \frac{\omega}{\omega_0} d\tau_{\text{пк}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Theta_M}{\Theta_0}\right) x \times d\tau_{\text{пк}} \quad (8)$$

и вместо (8)

$$\xi = \frac{0,25}{\sigma \Theta_0 \Theta_M^2} \ln \frac{(\Theta_M^2 + \Theta^2)(\Theta_M^2 - \Theta_0^2)}{(\Theta^2 - \Theta^2)(\Theta_M^2 + \Theta_0^2)} \quad (9)$$

Здесь ξ - безразмерная координата длины пути (высоты трубы **вагранки**, в которой происходит горение газов).

Переходя ко второй зоне, получим зависимость φ от Θ :

$$\varphi = 1 - e^{-\int_0^{\Theta} \frac{d\Theta}{\tau_{\text{пк}} + e \frac{1}{\Theta} \sigma (\Theta^4 - \Theta_M^4)}} \quad (10)$$

С учетом формул (6) и (9) найдем зависимость полноты горения смеси от времени пребывания в зоне горения или высоты трубы:

$$\varphi = f(\tau_{\text{пк}}) = f(\xi).$$

По кривой $\varphi = f(\xi)$, пренебрегая подводом тепла на участке активного горения, начало которого определяется по точке перегиба или касания кривых теплоотвода и тепловыделения, рассчитывается зависимость $\Theta = f(\xi)$.

Аналогичным образом рассчитывается уточненная зависимость температуры и времени пребывания. В частности, для адиабатической задачи и кинетического горения смеси, в случае полного предварительного перемешивания, можно соответственно записать:

$$\tau_{\text{ПК}} = \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{e^{1/\Theta}}{\Theta_M - \Theta} d\Theta = \int_0^{\varphi} \frac{e^{\frac{1}{\Theta_0 + \varphi\sigma}}}{1 - \varphi} d\varphi; \quad (11)$$

$$\tau_{\text{ПК}} = \frac{\varphi}{1 - \varphi} e^{\frac{1}{\Theta_0 + \varphi\sigma}} \quad (12)$$

Было проведено математическое моделирование процесса дожига в широком диапазоне режимов, возникающих в вагранках различного типа. Проанализировано более 2 тыс. вариантов процесса в различных граничных условиях.

Анализ полученных данных позволяет установить пределы существования гистерезисного процесса (горения):

$$10 \leq \tau_{\text{ПК}} \leq 10^4; \quad 0 \leq \sigma \leq 10^{-3}; \quad 0,08 \leq \Theta_M \leq 0,15.$$

Снизить значение σ на вагранках открытого типа можно, в частности, путем экранирования загрузочного окна завесой из цепей. При этом потери на излучение практически будут устранены.

Моделирование процесса позволяет определить пути повышения устойчивости процесса. Так, при малых \mathcal{T} (соответственно малых концентрациях CO) и Θ_0 кривые тепловода пересекают график в начальной области, что свидетельствует о невозможности самовоспламенения смеси. За счет создания местного сужения в трубе вагранки выше завалочного окна и последующего резкого расширения потока можно заставить часть высокотемпературных продуктов сгорания циркулировать, возвращаясь к корню факела. В этом случае кривая как бы поворачивается вокруг точки ($\varphi = 1, \Theta = \Theta_M$) (рис.1).

Это обеспечивает устойчивое поджигание потока в области сужения шахты. Количество циркулирующих газов для подобного режима можно подсчитать, найдя новое значение Θ_0' или σ' через $\text{tg} \alpha = -\frac{1}{\sigma'}$. Затем определяется необходимая величина диафрагмирования сечения с учетом ω_{0M} и Re .

При невозможности обеспечить горение за счет циркуляции (большие σ , $\tau_{\text{ПК}}$, малые \mathcal{T}) необходимо осуществить дополнительный подвод тепла от постороннего источника. Последним могут быть различные излучатели - электронагреватели,

спирали или жаровые трубки, а также горелки — запальники на газообразном или жидком топливе. Первый способ для ваграночных газов, как правило, не применяется, однако используется в туннелях запальников.

При подводе тепла кривая φ_n смещается параллельно начальной в сторону увеличения Θ (рис. 1):

$$\varphi_n = \frac{1}{\beta'} (\Theta - \Theta_0 - \beta' z_{\text{ПК}}), \quad (13)$$

где $\beta' = \frac{q^1 R}{c_p k_o E}$ — коэффициент подвода тепла; q — расход топлива.

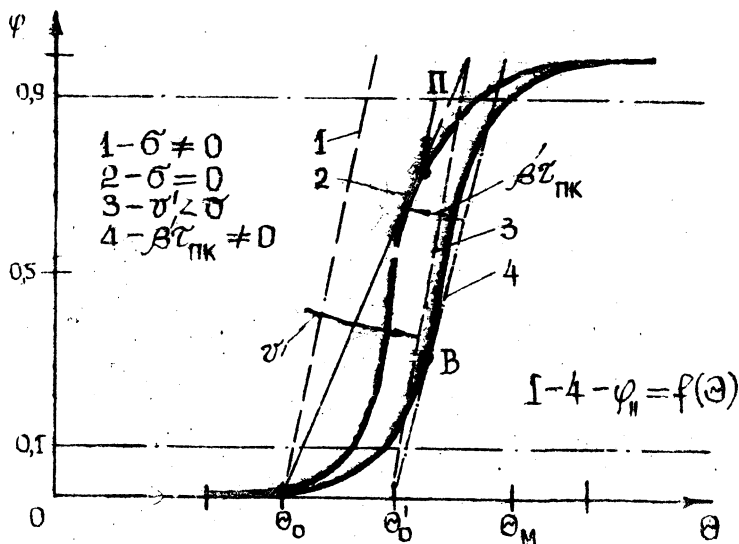


Рис. 1. Процесс горения ваграночных газов в условиях сложного теплообмена

Уравнения (1), (2) и (10) позволяют аналитическим путем определить температуру воспламенения при заданных условиях. Для этого нужно выражение для третьей производной $\frac{d^3\varphi}{d\Theta^3}$ приравнять 0 на участке разогрева. Найденное значение для Θ и будет искомым температурой воспламенения смеси. По дан-

ной схеме расчета можно определить также расход дополнительного топлива, исходя из конкретных условий процесса: концентрации горючих компонентов и состава смеси, начальной температуры, диаметра шахты, скорости и турбулентности потока газов, коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена. Одновременно анализ графиков $\psi = f(\bar{z})$ и $\varphi = f(\Theta)$ позволяет выбрать место ввода продуктов сжигания дополнительного топлива (высоту установки горелки-запальника).

Л и т е р а т у р а

1. Вулис Л.А. Тепловой режим горения. М., Госэнергоиздат, 1954. 2. Франк-Каменецкий Д.Н. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., "Наука", 1967.

С.Н. Леках, А.Г. Слуцкий, А.П. Филиппович

АНАЛИЗ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ВАГРАНКОВ

Процесс улавливания пылегазовых выбросов от плавильных печей определяется рядом факторов, из которых большее значение имеют физикохимические свойства пыли. Поэтому для выбора, расчета и проектирования систем очистки необходимо знание комплекса свойств пылевых выбросов.

В связи с этим исследовались минералогический и дисперсный составы пыли, ее электропроводность и удельный вес. Пробы для анализа были отобраны на вагранках различной мощности ряда заводов г. Минска, а также на полупромышленной вагранке лаборатории кафедры машин и технологии литейного производства БПИ.

Оптический и электронно-микроскопический анализы показали, что ваграночная пыль имеет сложный многокомпонентный состав, причем размеры и форма ее частиц не однородны. Имеются частицы шаровидной формы и частицы с рыхлой структурой, характеризующиеся весьма развитой поверхностью.

Это связано с различной природой образования пыли. Частички кокса, флюсов, стружки, окалина, окислов образуются за счет механических разрушений при завалке шихты в вагранку и ее движения в зоне подогрева. Пыль данного происхождения имеет, как правило, остроугольную форму.

Включения шлака и возгоны формируются в зоне плавления и перегрева, а частицы, имеющие сложный химический состав, образуются в результате гетерогенных реакций между состав-