

УДК 669. 041

ОСНОВЫ НАУЧНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПЕЧЕЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Д. А. Диомидовский

Сущность работы металлургической печи. Современные металлургические печи наиболее правильно рассматривать как сложные физико-химические агрегаты, в которых протекает целый комплекс разнообразных по своей природе процессов. Если объединить эти процессы в наиболее характерные их разновидности, то можно выделить следующие: технологический, теплообменный, энергетический, движение газов, движение материалов и продуктов *. Все они протекают в рабочем пространстве печи в тесной взаимной связи и взаимной обусловленности и часто совпадают по своему назначению и определению. Например, технологический процесс окисления сульфидов является одновременно и энергетическим, обеспечивающим необходимое для работы печи тепловыделение. Движение расплавленного шлака в руднотермических электропечах является одновременно и процессом конвективного теплообмена в ванне. Главным из указанных процессов, конечно, является технологический, поэтому основные параметры металлургических печей и развитие всех процессов в них должны обеспечивать технологическому процессу оптимальные условия течения с наилучшими качественными и количественными показателями.

Таким образом, научная методика расчета металлургических печей должна базироваться на количественных связях величин, наиболее влияющих на течение перечисленных процессов в конкретных условиях той или иной металлургической печи.

Основные количественные связи печных процессов. Представим металлургическую печь в элементарном виде (см. рисунок). В рабочем пространстве печи V располагаются твердые и жидкие материалы и продукты переработки, занимающие долю печного объема V_m . В рабочее пространство печи поступают воздух, материалы и энергия, и выходят из него газы, продукты и энергия.

Применительно к этой схеме ниже приведены обобщенные уравнения, характеризующие количественное развитие основных печных процессов.

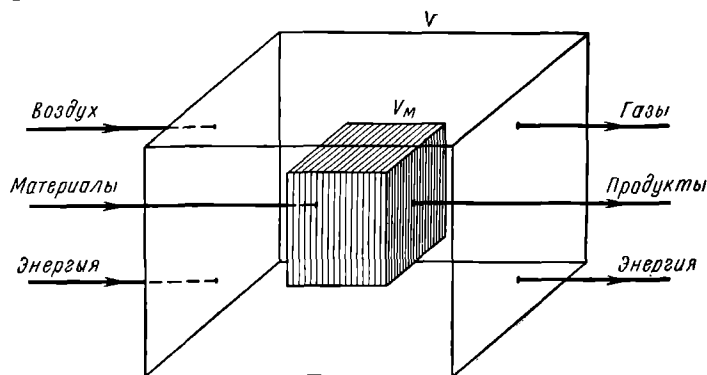
Технологический процесс заключается в физико-химических превращениях исходных материалов в конечные продукты требуемого состава. Количественно технологический процесс определяется скоростью хими-

* Теория и практика работы современных промышленных печей. Матер. конференции, Госэнергоиздат, 1963.

ческих и диффузионных преобразований и взаимодействий материалов и продуктов:

$$A = V_m \varphi C_{\Sigma_{\max}} \tau, \quad (1)$$

где A — производительность печи, $т/сутки$; V_m — объем рабочего пространства, занятый материалами и продуктами, $м^3$; φ — коэффициент перемешивания или контактирования материалов, определяемый развитием процесса массообмена, доли единицы; $C_{\Sigma_{\max}}$ — суммарная максимальная скорость физико-химических превращений материалов при идеальных условиях контактирования ($\varphi = 1$); наиболее достоверно определяется экспериментально при воспроизведении условий печного пространства, $т/(м^3 \cdot ч)$; τ — число рабочих часов печи в сутки.



Обобщенная схема печи.

Теплообменный процесс состоит в подводе или отводе определенного количества тепловой энергии к материалам, совершающим физико-химические превращения, при которых изменяется энергетический уровень системы. Теплообмен может быть направлен к материалу или от него, но во всех случаях описывается уравнением

$$\frac{A}{\tau} q_m = \alpha_{\Sigma} (t_n - t_m) F_m, \quad (2)$$

где q_m — теплопотребление исходных материалов (шихты); может определяться экспериментально или расчетно и иметь положительное или отрицательное значение, $кдж/т(квт \cdot ч/т; ккал/т)$; α_{Σ} — коэффициент суммарной теплоотдачи от печи к материалу или наоборот, $квт/(м^2 \cdot град)$ [$ккал/(м^2 \cdot ч \cdot град)$]; t_n — средняя температура элементов печи, отдающих или воспринимающих тепло, $^{\circ}C$; t_m — средняя температура поверхности материала, воспринимающей или отдающей тепло, $^{\circ}C$; F_m — поверхность материала, участвующая в теплообмене, $м^2$.

Как следует из уравнения, независимо от значения и знака величины теплопотребления q_m металлургическая печь всегда является теплообменным аппаратом и поэтому предлагаемое М. А. Глинковым * деление всех печей на теплообменники и теплогенераторы не вызывается необходимостью.

Энергетический процесс обеспечивает подачу в рабочее пространство печи или изымает из него определенное количество тепловой энергии, недостающее или выделяющееся при технологических превращениях,

* Теория и практика работы современных промышленных печей. Матер. конференции, Госэнергоиздат, 1963.

а также компенсирующее тепловые потери печи. Это выражается в первую очередь уравнением теплового баланса

$$\frac{A}{\tau} q_m + \sum Q_{\text{пот}} = Ex, \quad (3)$$

где $\sum Q_{\text{пот}}$ — потери тепла печью с газами и во внешнюю среду, *квт·ч* (*ккал/ч*); E — удельное количество тепла, выделяемое в рабочем пространстве печи или уносимое из него, отнесенное на единицу расхода топлива, электроэнергии или теплоносителя, *кдж(ккал)*; x — расход топлива, электроэнергии, теплоносителя, *единица измерения/ч*.

Однако энергетический процесс (положительный или отрицательный), кроме уравнения теплового баланса, определяется и возможностями развития его в объеме рабочего пространства печи V . Эти возможности зависят от многих условий и в частности от суммарной скорости сжигания топлива (для топливных печей) и от условий преобразования электрической энергии (для электрических печей). Так как эти зависимости находятся пока еще в самой начальной стадии выявления, примем, что величиной, определяющей развитие энергетического процесса в рабочем пространстве печей, является рекомендуемое тепловое или энергетическое напряжение рабочего пространства $q_{\text{рек}}$, *квт/м³* [*ккал/(м³·ч)*]. Эта величина пока находится опытным путем, но со временем будет расшифрована соответствующими исследованиями.

Тогда энергетический процесс в рабочем пространстве печей должен подчиняться уравнению

$$kVq_{\text{рек}} = Ex, \quad (4)$$

где k — коэффициент, определяющий долю объема рабочего пространства печи, в котором протекает энергетический процесс, доли единицы.

Движение газов имеет чрезвычайно важное значение в печах, потому что количество газов по объему во много раз превосходит количество твердых и жидких материалов. Многие размеры печей поэтому надо определять прежде всего из условия нормального движения газов, что впервые наиболее обстоятельно показано В. Е. Грум-Гржимайло.

Основное уравнение, связывающее движение газов с размерами печей, получается на основании материального баланса печи (или зоны) по объемам образующихся идвигающихся газов:

$$\left(\frac{A}{t} V_1 + V_2 x + V_3 \right) (1 + \beta t) = 3600 F_r v_t, \quad (5)$$

где V_1 — удельный объем газов, выделяющихся из шихты, приведенный к нормальным условиям, *м³/т*; V_2 — удельный объем газов, выделяющихся от энергетического процесса, приведенный к нормальным условиям, *м³/единица измерения*; V_3 — подсос воздуха в печь, приведенный к нормальным условиям, *м³/ч*; t — средняя температура газов в печи (зоне), °C; β — коэффициент объемного расширения газов; F_r — полное газовое сечение печи (зоны), *м²*; v_t — действительная скорость газов в печи (зоне), отнесенная к полному газовому сечению, *м/сек*.

Важнейшей определяющей величиной этого уравнения является скорость движения газов, которая выбирается в зависимости от уноса пыли для пламенных печей, от устойчивости шихтового столба для шахтных печей, от условий псевдооживления материала для печей с кипящим слоем, от выбросов массы и усвоения газов ванной для печей с продувкой расплавов и т. д.

Движение твердых и жидких материалов и продуктов (массообмен) в значительной степени учтено уравнениями (1) — (5) в виде следующих величин: коэффициента перемешивания материалов ϕ ; коэффициента теплоотдачи α_{Σ} ; поверхности материала, участвующей в теплообмене, F_m ; скорости газов, зависящей от движения материалов, v_t и др.

В ряде случаев движение материалов и продуктов имеет и самостоятельное значение, влияющее на основные размеры печей, в соответствии с уравнением

$$\frac{A}{\tau q_n} = F_{\text{тж}} v_m, \quad (6)$$

где q_n — объемная масса материалов в печи, $т/м^3$; $F_{\text{тж}}$ — сечение печи, через которое происходит движение твердых или жидких материалов, $м^2$; v_m — линейная скорость движения материалов или продуктов в печи, $м/ч$.

Кроме этих основных уравнений, для каждого типа и геометрической формы печи можно написать ряд вспомогательных чисто геометрических зависимостей, связывающих между собой основные размеры печного пространства, V , V_m , F_m , F_{Γ} , $F_{\text{тж}}$ и др.

Общая схема расчета металлургических печей. Используя основные уравнения (1) — (6), можно наметить следующую общую схему расчета металлургических печей. Задание на расчет печи должно содержать в себе: производительности печи A , $т/сутки$; число рабочих часов в сутки τ , ч; E — удельное тепловыделение или теплопоглощение энергоносителя, $кдж(ккал)/единица измерения$; характеристики исходных материалов и конечных продуктов, дающие возможность найти величины $C_{\Sigma_{\text{max}}}$ и q_m . При наличии этих данных порядок расчета может быть примерно следующим.

По уравнению (1) находят величину V_m , задаваясь величиной ϕ , характеризующей перемешивание (массообмен) материалов и продуктов. По выражению (3) определяют x , задаваясь величиной $\sum Q_{\text{пот}}$ по предварительным данным. По уравнению (4) рассчитывают V , исходя из принятой величины $q_{\text{рек}}$. По формуле (2) рассчитывают F_m , а по уравнению (5) — величину F_{Γ} . Если движение твердых и жидких материалов может существенно влиять на размеры печи, то по уравнению (6) находят $F_{\text{тж}}$.

Сопоставлением размерных величин, полученных по расчету V_m , V , F_m , F_{Γ} и $F_{\text{тж}}$ друг с другом и с уравнениями геометрических связей, определяют линейные размеры печи, обеспечивающие заданную производительность при определенных свойствах сырья и производимых продуктов и известной характеристике энергоносителя.

Для отдельных типов печей сопоставлять полученные размерные величины и определять линейные размеры рабочего пространства можно непосредственно по ходу расчета.

В заключение расчета после нахождения линейных размеров рабочего пространства следует по этим размерам проверить производительность печи по всем шести основным уравнениям и при необходимости внести исправления в размеры печи.

Анализ и оценка основных уравнений. Система уравнений (1) — (6), связывающая количественные характеристики основных печных процессов с размерами металлургических печей, применима к любому типу печей и может считаться универсальной. Однако при расчете многих типов металлургических печей эта система пока ограничена отсутствием данных по ряду величин, входящих в эти уравнения ($C_{\Sigma_{\text{max}}}$, ϕ ,

α_{Σ} , $q_{\text{рек}}$, v_i и др.). Поэтому неотложными задачами исследований печей цветной металлургии является восполнение этих данных.

Применяемые методы расчета печей цветной металлургии и большинство расчетных формул и уравнений вытекают из системы уравнений (1) — (6) и являются их частными случаями*.

Например, решая уравнение (2) относительно A , получим

$$A = \frac{\alpha_{\Sigma}(t_n - t_m) F_m \tau}{q_m}.$$

Для отражательных печей формулу можно преобразовать заменой в ней составляющих

$$\begin{aligned}\alpha_{\Sigma}(t_n - t_m) &= 4,67 \varepsilon_{\text{ГКМ}} \left[\left(\frac{T_{\text{Г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right]; \\ F_m &= F_{\text{ш}} + F_{\text{в}}; \\ q_m &= q_{\text{ш}},\end{aligned}$$

где $4,67 \varepsilon_{\text{ГКМ}}$ — приведенный коэффициент излучения газов, кладки и шихты, учитывающий также и конвекцию, $\text{квт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}^4)$ [$\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{К}^4)$]; $T_{\text{Г}}$ и $T_{\text{М}}$ — средние температуры газов и поверхности шихты и ванны, $^\circ\text{К}$; $F_{\text{ш}}$ и $F_{\text{в}}$ — тепловоспринимающие поверхности шихты и ванны, м^2 ; $q_{\text{ш}}$ — теплопотребление шихты, $\text{кдж}/\text{т}(\text{ккал}/\text{т})$.

После подстановки получаем формулу, по которой в настоящее время рассчитывают отражательные печи,

$$A = \frac{4,67 \varepsilon_{\text{ГКМ}} \left[\left(\frac{T_{\text{Г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] (F_{\text{ш}} + F_{\text{в}}) \tau}{q_{\text{ш}}}, \text{ м/сутки.} \quad (7)$$

Аналогично можно рассчитать производительность трубчатых печей. Из уравнения (3) можно получить формулу, применяемую для расчета электрических печей. Представим уравнение (3) в несколько измененном виде

$$\frac{A}{\tau} \left(q_m + \frac{\tau \sum Q_{\text{пот}}}{A} \right) = Ex.$$

Здесь выражение в скобках представляет собой расход тепловой энергии на 1 т материала с учетом всех потерь в самой печи.

Для электрических печей потери энергии в короткой сети и трансформаторе учитывают некоторым коэффициентом k_1 .

Умножим обе части преобразованного уравнения (3) на k_1 :

$$\frac{A}{\tau} k_1 \left(q_m + \frac{\tau \sum Q_{\text{пот}}}{A} \right) = Exk_1.$$

В этом новом выражении удельный практический расход электроэнергии (при условии, что величина q_m выражена в $\text{квт} \cdot \text{ч}/\text{т}$)

$$k_1 \left(q_m + \frac{\tau \sum Q_{\text{пот}}}{A} \right) = W, \text{ квт} \cdot \text{ч}/\text{т};$$

активная мощность печного трансформатора

$$Exk_1 = P \cos \varphi_1, \text{ квт.}$$

* Диомидовский Д. А., Шалыгин Л. М., Гальнбек А. А., Южанинов И. А. Расчеты пиропроцессов и печей цветной металлургии. Металлургиздат, 1963.

После подстановки новых величин получаем известную формулу для расчета электрических печей

$$A = \frac{P \cos \varphi_1 \tau}{W}, \text{ м/сутки.} \quad (8)$$

На основании уравнения (5) можно вывести расчетные формулы, по которым рассчитывают конвертеры, шахтные печи и печи кипящего слоя. Для конвертеров уравнение (5) упрощается вследствие $x = 0$ и $V_3 = 0$ и принимает вид

$$\frac{A}{\tau} V_1 = \frac{3600 F_r v_t}{1 + \beta t},$$

где V_r — общий объем газов, выходящих из конвертера, $\text{м}^3/\text{ч}$,

$$V_r = \frac{3600 F_r v_t}{1 + \beta t};$$

V_1 — удельный объем газов, образующихся при переработке 1 т штейна, $\text{м}^3/\text{т}$.

Так как приведенный к нормальным условиям объем конвертерных газов для каждого состава штейна пропорционален приведенному объему расходуемого на продувку воздуха, то

$$V_r = a V_{\text{конв}};$$

$$V_1 = a V_{\text{уд}},$$

где $V_{\text{конв}}$ — общий объем воздуха, подаваемого в конвертер, или так называемая пропускная способность конвертера, $\text{м}^3/\text{ч}$; $V_{\text{уд}}$ — удельный расход воздуха на 1 т штейна, $\text{м}^3/\text{т}$; a — переходный коэффициент.

После замены объемов газов на соответственные объемы воздуха и подстановки этих выражений в преобразованное уравнение (5) получим известную формулу расчета конвертеров

$$A = \frac{V_{\text{конв}} \tau}{V_{\text{уд}}}, \text{ м/сутки.} \quad (9)$$

Аналогично можно вывести формулы для шахтных и обжиговых печей с кипящим слоем.

Выводы

1. Предложенная система уравнений комплексно описывает работу печей цветной металлургии и выделяет главные количественные связи между основными параметрами печей и их размерами.

2. Большинство применяемых в настоящее время формул для расчета печей является частными решениями уравнений предложенной системы.

3. Дальнейшее развитие и совершенствование методик расчета печей должно идти по пути экспериментального и теоретического раскрытия значений величин, входящих в основные уравнения.