ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

The given methods can be used for calculation of heat exchange in the burden heating outfits and melting units of foundry with fiber moving of heat carrier.

Л. Е. РОВИН, Т. М. ЗАЯЦ, ГГТУ им. П.О. Сухого

УДК 621.745

НАГРЕВ В СЛОЕ ДИСКРЕТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Процессы теплообмена в слое имеют место в печах и установках металлургической, литейной, энергетической, химической промышленности и других отраслях народного хозяйства.

Нагрев материалов в слое представляет собой сложный случай теплообмена. Плотный слой образуется кусками различной формы и размеров, имеющими разные теплофизические свойства. Сложный характер движения и структуры слоя затрудняет определение реальной поверхности теплообмена. Различная величина зазоров между кусками влияет не только на особенности омывания их газами, но делает неразделимыми процессы теплопроводности, излучения и конвекции, действующие в слое. Поэтому при расчете приходится одновременно учитывать все три вида теплообмена.

Теплопроводность слоя $\lambda_{сл}$ зависит не только от материала компонентов, но и от их укладки, порозности слоя и др., причем величина $\lambda_{сл}$ на несколько порядков ниже λ компонентов и изменяется в процессе нагрева. Тепловая энергия внутрь слоя передается теплопроводностью и конвекцией. Последняя зависит от режима движения и распределения газов и геометрии компонентов.

Тепло при нагреве сплошного материала передается от рабочего пространства печи к металлу через поверхность и далее распространяется по телу теплопроводностью (рис. 1).

В случае нагрева дискретного материала процесс теплообмена становится более сложным. Хотя размер удельной поверхности материала большой, поверхность, облучаемая печью, незначительная, а конвекцией тепло «закачивается» внутрь слоя в случае прохождения потока через слой.

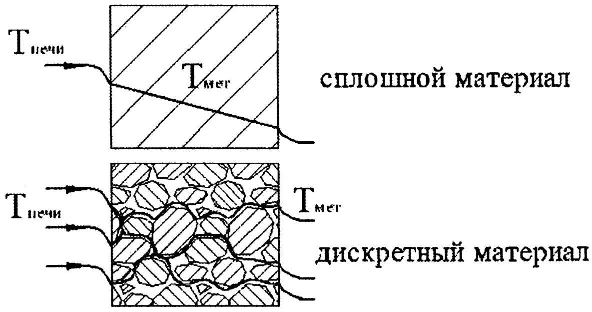

Рис. 1. Перенос тепла в материале

Принятая в металлургической практике методика расчетов теплообменных процессов в печах, работающих по схеме плотного противоточного слоя, в частности шахтных печах, разработанная Б.И. Китаевым, основана на представлении процесса нагрева слоя шихты как квазистационарного объекта.

При этом распределение температур как по горизонтали, так и вертикали постоянно во времени и зависит только от координаты. Такой метод позволяет найти распределение температур в слое в зависимости от соотношения теплоемкостей и режимов движения потока газов сквозь кусковые материалы слоя.

Для условий установки подогрева шихты: $W_г < W_ш$, где $W_г$ и $W_ш$ – соответственно удельные теплоемкости газов и шихты: $W_г = c_г V_г$, $W_ш = M_ш c_ш$.

Слой шихты характеризуется при этом высотой h, постоянным сечением s, массой $M_ш$, теплоемкостью $c_ш$, расход газов постоянен и равен $V_г$, теплоемкость газов $c_г$. Причем $c_г$ и $c_ш$ равны средним значениям по температуре.

В элементарном слое изменения энтальпий шихты и газов равны: $di_ш = di_г$ или $dq_г = di_{ш.г}$.

При конвективном теплообмене

$$\alpha_v (t_г - t_ш) s dx = M_ш c_ш dt_ш = W_ш dt_ш \,, \qquad (1)$$

где α_v – объемный коэффициент теплоотдачи: $\alpha_v = \alpha F$.

При $t_ш^{нач} = 0$ $\quad W_г t_г^{нач} - W_г t_г^{кон} = W_ш t_ш^{кон}$ и

$$t_г = t_г^{кон} + \frac{W_ш}{W_г} t_ш \,.$$

Подставив это выражение в (1), после преобразований получим

$$dt_ш + \frac{\alpha_v s}{W_ш}\left(1 - \frac{W_ш}{W_г}\right) t_ш dx - \frac{\alpha_v s}{W_ш} t_г^{кон} dx = 0 \,. \qquad (2)$$

Решая уравнение (2) при граничных условиях, имеем

$$t_ш = t_г^{нач}\left(1-\exp\left(-\frac{\alpha_v s}{W_ш}\left(1-\frac{W_ш}{W_г}\right)x\right)\right). \qquad (3)$$

Исследования температурного режима нагреваемого слоя шихты, в частности динамики распределения температур в слое по тракту потока газов, показали, что имеется близкое совпадение параметров процесса с распределением температур в нагреваемой сплошной заготовке при граничных условиях I рода при нестационарной теплопроводности.

Такое внешнее подобие, несмотря на принципиальное различие процессов передачи тепла теплопроводностью и конвекцией, позволяет сделать предположение о возможном применении уравнения Фурье для описания процессов подогрева шихты в неподвижном слое.

В этом случае вместо теплового сопротивления теплопроводности $\left(\frac{S}{\lambda}\right)$ можно использовать аналогичную величину $\left(\frac{1}{\alpha_к}\right)$ и, как при упрощенных решениях уравнений нестационарной теплопроводности, принять ее постоянной в диапазоне температур процесса.

Тогда уравнение Фурье можно записать в виде

$$\frac{Dt}{d\tau} = a_{пр}\nabla^2 t, \qquad (4)$$

где $a_{пр} = \frac{\alpha_к d_{экв}}{c\rho}$ вместо $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициента температуропроводности при нагреве за счет теплопроводности; $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр куска шихты.

Для условий нагрева слоя шихты уравнение (4) можно представить в одномерном виде

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{пр}\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \qquad (5)$$

При этом изменения температуры по горизонтальным сечениям слоя считаем незначительными, а нагрев по условию осуществляется с одной стороны (вдоль координаты x).

Используя метод разделения переменных, текущую температуру t представим как $t=f(x)f(\tau)$, т.е. произведение двух функций, зависящих соответственно только от x и τ. Обозначив $f(x)$ и $f(\tau)$ величинами L и T и продифференцировав их, получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = L\frac{dT}{d\tau}, \quad \frac{\partial t}{\partial x} = T\frac{dL}{dx}, \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = T\frac{d^2 L}{dx^2}.$$

Подставив эти выражения в (5), имеем

$$\frac{1}{a_{пр}T}\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{L}\frac{d^2 L}{dx^2}. \qquad (6)$$

Равенство (6) выполняется только при условии, что левая и правая часть уравнения равны постоянной величине. Обозначая эту константу как $-\beta^2$ (минус характеризует то, что по ходу движения газового потока в слое, иначе с увеличением времени τ, температура падает), и, проведя преобразования, получаем

$$\frac{t-t_0}{t_г-t_0} = 1-\frac{2\sin(h\beta)\cos(\beta x)}{h\beta+\sin\ h\beta\cos\ h\beta}e^{-(h\beta)^2\,\mathrm{Fo}}. \qquad (7)$$

При порозности слоя 0,4–0,5, что соответствует реальной шихте, состоящей из скрапа и возврата, коэффициент теплопроводности можно рассчитать как суммарный, состоящий из парциальных вкладов $\lambda_ш$ металла и $\lambda_г$ газовой прослойки.

В этом случае $\lambda_\Sigma = n_ш\lambda_ш + \lambda_г n_г$:

$$\lambda_\Sigma = 0,6(48-51)+0,4(0,05-0,08) = (29-30),$$

Вт/(м · К).

По экспериментальным данным внешний коэффициент теплообмена α для условий работы установки подогрева шихты колеблется от 15 до 25 Вт/(м^2 · К). Отсюда для слоя шихты при $S \geq 1$ м число $\mathrm{Bi} \gg \mathrm{Bi}_{кр}$.

Используя методы решения, разработанные для решения задач нагрева твердых тел с низкой теплопроводностью, в частности метод источника для уравнения (7), получаем выражение для текущей температуры:

$$t = \frac{\Delta T_п}{2\sqrt{\pi a_{пр}\tau}}\exp\left(-\frac{(x-h)}{4a_{пр}\tau}\right)dh, \qquad (8)$$

где $\Delta T_п$ – температура источника, в данном случае – температура газов на входе в слой; h – координата, в данном случае высота слоя.

Экспериментальная проверка уравнения для расчета распределения температур в слое нагреваемой шихты массой 5 т для плавки в индукционной печи показала хорошую сходимость с расчетными данными (рис. 2).

Данная методика может быть использована для расчета теплообмена в установках подогрева шихты и плавильных агрегатах литейного производства с послойным движением теплоносителя.

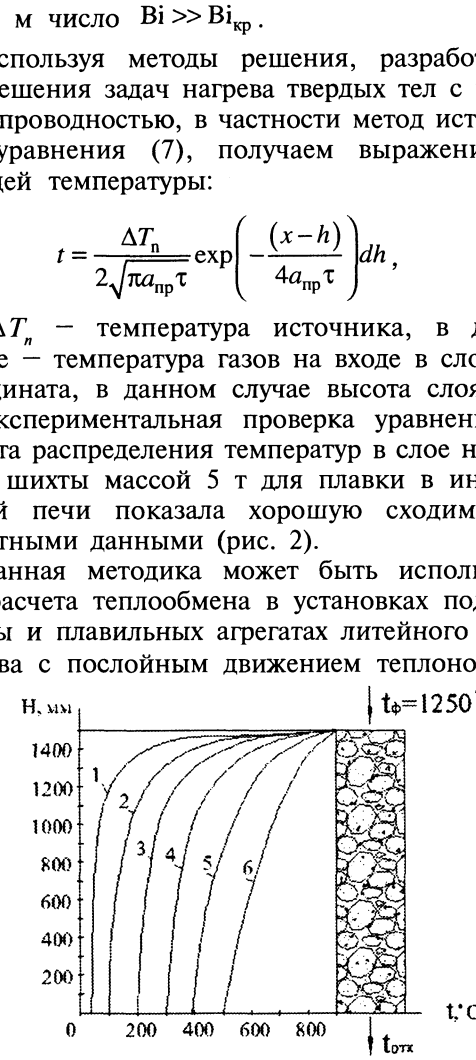

Рис. 2. Распределение температуры по высоте слоя шихты в зависимости от времени: *1* – 1–3 мин; *2* – 3–5; *3* – 5–7; *4* – 7–9; *5* – 9–12; *6* – 12–15 мин