

## ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРОДУВАЕМОГО СЛОЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

Метод обработки слоя в режиме тепловых волн, нашедший широкое применение при агломерации железных руд, может быть с успехом использован в других областях техники.

Достоинство метода состоит в высокой тепловой эффективности процесса, достигаемой благодаря локализации тепла зоны горения в тепловой волне, перемещающейся через спекаемый слой.

Содержание метода состоит в сопровождении тепловой волны последовательным перемещением мест подвода энергии из расчета, чтобы скорость переключения источника тепла совпадала со скоростью движения свободной тепловой волны.

Математическая модель явления записывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \rho c_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} &= \lambda \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} - j c_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} + q(x, \tau), \\ j c_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} &= \frac{\alpha}{r_v} (t_1 - t_2). \end{aligned} \right\} (1)$$

Система (1) сводится к уравнению кондуктивного типа

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot a_{\text{эф}} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - u \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{q(x, \tau)}{\rho c_1}$$

или в подвижной системе координат

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{эф}} \frac{\partial^2 t}{\partial \xi^2} + \frac{q(x, \tau)}{\rho c_1}. \quad (2)$$

Соотношение (2) при  $q = 0$  выражает движение тепловой волны, рассеиваемой по законам конвективного и кондуктивного теплообмена. При этом затухающая амплитуда волны перемещается со скоростью  $u$ , которую называем скоростью свободного переноса.

Прогнозирование уровня термической эффективности процесса в слое при наличии подвижного источника тепла может быть выполнено на основании двух крайних случаев теплообмена, приближающих реальные условия. Оценку с недостатками осуществим в предположении, что источник тепла в уравнении (2) размещен в плоскости перемещающейся амплитуды тепловой волны и отрегулирован таким образом, чтобы амплитуда волны имела постоянное значение, равное  $t^*$ . Тогда выражения мощности внутренних источников и количества тепла, накопленного в слое к моменту  $\tau$ , примут вид

$$q = t^* \rho c_1 \sqrt{\frac{\pi a_{\text{эф}}}{\tau}},$$

$$Q = t^* \rho c_1 \sqrt{4 \pi a_{\text{эф}} \tau}. \quad (3)$$

Поскольку распределенные источники не обеспечивают предельной локализации тепла, при оценке с избытком предположим, что тепло равномерно распределяется по профилю свободной тепловой волны, возбужденному тепловым импульсом (решение уравнения (2) при  $q = (\xi, \tau) = Q \delta(\tau) \delta(\xi)$ ).

Температурный профиль при этом принимает вид

$$t_1(\xi, \tau) = \frac{Q}{\rho c_1 \sqrt{4 \pi a_{\text{эф}} \tau}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4 a_{\text{эф}} \tau}\right).$$

Аналогичные соотношения для мощности источника тепла и интегрального тепла в этом случае принимают вид

$$q = 2 t^* \rho c_1 \sqrt{\frac{a_{\text{эф}}}{\pi \tau}},$$

$$Q = 4 t^* \rho c_1 \sqrt{\frac{a_{\text{эф}} \tau}{\pi}}. \quad (4)$$

Введем в рассмотрение величину тепловой эффективности обработки инертного слоя  $\eta$ , определяемую как отношение тепла адиабатного нагрева слоя до температуры  $t^*$  и тепла обработки слоя при той же температуре в режиме тепловых волн. Оценки с избытком и недостатком дают соответственно следующие выражения тепловой эффективности

$$\eta = \sqrt{\frac{uH}{4 \pi a_{\text{эф}}}}, \quad \eta = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi uH}{a_{\text{эф}}}}. \quad (5)$$

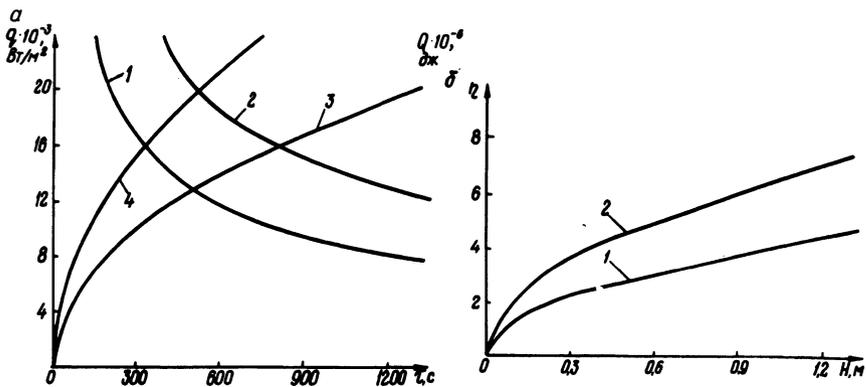


Рис. 1. Теоретические оценки (а) мощности внутренних источников тепла (1,2) и теплосодержание тепловой волны (3,4) для цеолита СаА (1, 3—оценка с избытком; 2,4—оценка с недостатком) и тепловая эффективность (б) процесса в зависимости от высоты слоя (1—оценка с избытком, 2—оценка с недостатком).

Поскольку одним из реальных приложений метода обработки слоя в режиме тепловых волн является процесс десорбции, был выполнен расчет указанных величин для слоя цеолита СаА (рис. 1).

Согласно формулам (3)–(5) для обеспечения постоянной амплитуды волны необходимо подводить тепло в слой по гиперболическому закону  $q \sim \sqrt{\tau}$ . Указанная зависимость имеет две характерные особенности — резкая неустойчивость теплового режима при  $\tau \rightarrow 0$  и стабильность энергоподвода при больших  $\tau$ . Поэтому в практике из соображения устойчивости тепловой волны целесообразно увеличить энергосодержание начального профиля волны, при этом несколько уменьшается тепловой к.п.д. процесса.

Экспериментальное исследование было выполнено на установке шахтного типа с цилиндрической частью. Высота слоя равнялась 0,5 м, диаметр — 0,1 м. По высоте слоя на расстоянии 0,04 м друг от друга были расположены электрические нагреватели, равномерно размещенные в сечении слоя. В плоскости спирали и в промежутке между ними располагались спай термопар. Типичные условия движения тепловой волны в слое цеолита СаА (1–2 мм) представлены на рис. 2. Эксперимен-

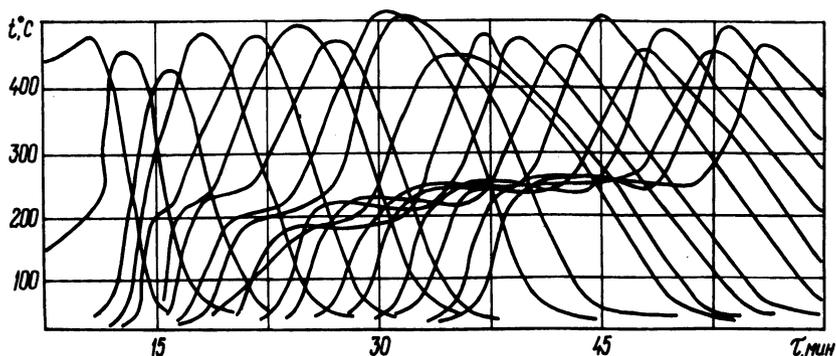


Рис. 2. Температурное поле слоя цеолита CaA при вынужденном переносе тепла (скорость фильтрации воздуха 0,142 м/с).

тальное отношение тепла на обработку слоя до средней температуры (490 Дж) к теплу адиабатного нагрева (1400 Дж) лежит в пределах теоретической оценки, задаваемой величинами  $\eta = 2,9-4,6$  (при  $N=400$ ).

Выполненный теоретический анализ и результаты экспериментального исследования подтверждают экономичность метода обработки слоя с распределенным источником тепла в режиме свободных тепловых волн, позволяющего в несколько раз сократить непроизводительные затраты тепла на разогрев массы скелета.

А.И. Козлов, Б.И. Крамник,  
В.Ф. Скалабан, А.А. Андреянов

### ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННИКОВ ИЗ РЕБРИСТО-ЗУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПЕЧАХ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПОД КОВКУ И ШТАМПОВКУ

Проблема утилизации тепла в пламенных печах во многом зависит от надежной и продолжительной работы металлических теплообменников.

Анализ работы рекуператоров в этих условиях показал, что продолжительность их эксплуатации во многом обусловлена правильным расчетом  $t_{ст}$  и фактического коэффициента теплопередачи  $K_{к.л} = f(T_g, \sigma_{пр})$ .