

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кузнецов В. А., д-р техн. наук, проф.,
Трулев А. В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕМПЕРАТУРА СТЕН ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

kouzn@intbel.ru

Разработан аналитический подход к расчету нестационарной температуры стен вращающейся печи при численном моделировании в ней процессов горения и теплообмена. Адекватность подхода проверена численным решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности стен в условиях вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: цементная вращающаяся печь, нестационарная температура, математическая модель, аналитический подход, вычислительный эксперимент.

Постановка задачи.

При обжиге цементного клинкера внутренняя поверхность стен вращающейся печи подвергается тепловому воздействию на нее поочередно газообразной среды и слоя технологического материала, что вызывает циклическое изменение ее температуры, способное приводить в итоге к разрушению футеровки. Определение нестационарной температуры вращающихся стен является актуальной задачей, решение которой необходимо для создания условий, обеспечивающих более длительную безостановочную работу печей.

Цель достигается путем численного решения системы дифференциальных уравнений процессов движения газов, горения и теплопереноса в печи. При этом нестационарная температура $T_{ст}$ внутренней поверхности стен печи является одной из искомым функций.

Чтобы найти эту температуру в процессе выполнения итераций, составляется уравнение баланса тепла, подводимого к внутренней поверхности стен печи от газов и слоя клинкера и отводимого от нее через стены печи:

$$q_k + q_l^r + q_l^m + q_{нст} = q_{отв}, \quad (1)$$

где q_k , q_l^r , q_l^m – плотность тепловых потоков подвода теплоты соответственно конвекцией, излучением газов и излучением слоя материала, $q_{нст}$ – плотность нестационарного потока теплоты, приносимой в участок l на поверхности стены из соседнего $l+1$ при вращении печи.

Как показано в [1], расчетные выражения для плотности тепловых потоков содержат искомую термодинамическую температуру $T_{ст}$ внутренней поверхности стен, так что ее можно выразить в явном виде и вычислить:

$$q_k = \sqrt{\rho_{ст}\rho_g} c_p \zeta (T_g - T_{ст}) / \Delta n,$$

$$q_l^r = 2\varepsilon_{ст}\sigma(T_{\Sigma}^4 - \alpha_{п}T_{ст}^4 / \alpha) / (3\alpha\Delta n),$$

$$q_l^m = (1 - \alpha_{п} / \alpha) \varepsilon_{пр}\sigma(\psi_{l,кл}T_{кл}^4 - T_{ст}^4),$$

Здесь $\rho_{ст}$, ρ_g – плотность газов на поверхности стен и вблизи нее, c_p – удельная массовая теплоемкость газов при постоянном давлении, ζ – коэффициент в граничных условиях турбулентного движения газов, σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\varepsilon_{ст}$, $\varepsilon_{пр}$ – степень черноты внутренней поверхности стен печи и приведенная, $\alpha_{п}$, α – планковский и локальный коэффициенты поглощения, T_g , $T_{кл}$ – температура газов вблизи стенки и слоя обжигаемого клинкера, T_{Σ} – определяющая температура радиационного переноса энергии, Δn – расстояние от ближайшего узла сетки в газовой среде до стенки печи, $\psi_{l,кл}$ – угловой коэффициент излучения участка l стены на слой клинкера.

Плотность нестационарного потока теплоты $q_{нст}$ в поверхностном слое Δr стены определяется с помощью дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

где ρ , c , λ – плотность, удельная массовая теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала поверхности стены, τ – время, r – координата по радиусу печи, T – температура.

Для численного решения задачи стены печи по толщине разбиваются сеткой на слои, причем толщина поверхностного слоя Δr не превышает 1 мм. Интегрирование дифференциального уравнения (2) по поверхностному слою Δr дает следующее дискретное выражение:

$$\frac{\rho c}{\Delta \tau} (T_{0,l} - T_{0,l+1}) \Delta r \approx \frac{\lambda}{\Delta r} (T_{1,l} - T_{0,l}) - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{0,l}$$

где $\Delta \tau_l$ – интервал времени перемещения элемента внутренней поверхности футеровки из узла сетки $l+1$ в узел l при вращении печи, $T_{0,l}$ – температура в узле сетки $j=0$, лежащем на внутренней по-

верхности участка l стены, $T_{1,l}$ – температура на том же участке l в узле $j=1$, ближайшем по оси r к поверхности стены,

Последнее слагаемое дискретного уравнения заменяется суммой тепловых потоков в соответствии с граничными условиями (1):

$$q_k + q_l^r + q_l^m + \frac{\rho c}{\Delta \tau_l} (T_{0,l+1} - T_{0,l}) \Delta r = \frac{\lambda}{\Delta r} (T_{0,l} - T_{1,l}).$$

Из сопоставления уравнения (1) с полученным следуют выражения для плотности нестационарного и отводимого тепловых потоков:

$$q_{\text{нст}} = \frac{\rho c}{\Delta \tau_l} (T_{0,l+1} - T_{0,l}) \Delta r, \quad (3)$$

$$q_{\text{отв}} = \frac{\lambda}{\Delta r} (T_{0,l} - T_{1,l}). \quad (4)$$

При компьютерном моделировании приходится решать сопряженную задачу радиационно-конвективного теплообмена в пламенном пространстве вращающейся печи и нестационарной теплопередачи через ее стены при неизвестной температуре внутренней поверхности стен. При этом разность двух неизвестных температур в формуле (4) вносит в расчет итерационную погрешность, которая многократно возрастает при ее делении на малую величину Δr . В таких условиях трудно ожидать сходимости итерационного решения поставленной задачи. Поэтому для учета нестационарного изменения температуры стен при численном моделировании теплообмена в цементной вращающейся печи применен упрощенный аналитический подход.

Аналитическое выражение нестационарного теплового потока

Пусть в момент входа вращающейся стены под слой клинкера температура ее внутренней поверхности скачкообразно изменяется от T_0 до более высокой температуры слоя клинкера $T_{\text{кл}}$. Применим к этому случаю аналитическое выражение плотности нестационарного потока аккумулируемой теплоты на поверхности полуограниченного твердого массива при внезапном изменении температуры его поверхности [2]:

$$q_{\text{ак}} = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \tau}} (T_{\text{н}} - T_0), \quad (5)$$

где τ – время, отсчитываемое от момента температурного скачка, T_0 , $T_{\text{н}}$ – соответственно первоначальная и новая температура поверхности нагреваемого полуограниченного массива.

Теплоотдача от слоя клинкера к футеровке отличается от задачи [2] тем, что в печи непрерывно входят под слой клинкера и испытывают температурный скачок все новые участки стен, время τ нагрева которых клинкером при прохождении угла $\Delta \varphi$ возрастает обратно пропорцио-

нально угловой скорости их вращения ω в соответствии с соотношением $\tau = \Delta \varphi / \omega$ (рис. 1).

Поскольку температура стен зависит от времени их пребывания под слоем клинкера, то количество теплоты $Q_{\text{ак}}$, аккумулированное стеной за один оборот на единице длины печи, находится интегрированием плотности теплового потока $q_{\text{ак}}$, определяемого формулой (5), по поверхности теплообмена F , пропорциональной углу φ , с учетом зависимости времени τ от угла φ :

$$Q_{\text{ак}} = \int_0^F q_{\text{ак}} dF = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi}} \omega R (t_{\text{кл}} - t_0) \int_0^{\Delta \varphi_{\text{кл}}} \varphi^{-1/2} d\varphi$$

где R – внутренний радиус печи, $\Delta \varphi_{\text{кл}}$ – центральный угол, занимаемый слоем клинкера в печи. Физические свойства материала стен полагаются постоянными.

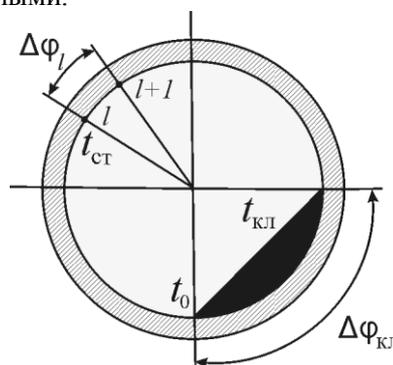


Рис. 1. Схема нестационарного теплообмена в печи: $t_{\text{кл}}$ – температура клинкера, $t_{\text{ст}}$, t_0 – температуры поверхности стенки печи, $\Delta \varphi_{\text{кл}}$ – центральный угол клинкерного слоя, l – номер расчетного участка

После математических преобразований получаем расчетную формулу:

$$Q_{\text{ак}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi}} \Delta \varphi_{\text{кл}} \omega R (t_{\text{кл}} - t_0) = 2 b_{\text{кл}} \Delta \varphi_{\text{кл}} R (t_{\text{кл}} - t_0), \quad (6)$$

где $\Delta \tau_{\text{кл}}$ – максимальное время пребывания футеровки под слоем клинкера, $b_{\text{кл}}$ – коэффициент, аналогичный коэффициенту теплоусвоения [2],

$$b_{\text{кл}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \Delta \tau_{\text{кл}}}}$$

Примем, что стены печи в течение одного оборота отдают теплоотдачей столько же теплоты, сколько они получили от клинкера. В этом случае можно приравнять друг другу правые части формул (3) и (6), учитывая при этом различие центральных углов стены, контактирующей с клинкером ($\Delta \varphi_{\text{кл}}$) и газовой средой ($\Delta \varphi_{\text{газ}}$):

$$\frac{\rho c}{\Delta \tau_{\text{газ}}} (t_{\text{кл}} - t_0) \Delta r_{\text{эк}} \Delta \varphi_{\text{газ}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \Delta \tau_{\text{кл}}}} (t_{\text{кл}} - t_0) \Delta \varphi_{\text{кл}}$$

Отсюда следует оценка эквивалентной толщины $\Delta r_{\text{ЭК}}$ поверхностного слоя футеровки, пригодная для расчета нестационарности теплообмена:

$$\Delta r_{\text{ЭК}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda}{\pi r c \Delta \tau_{\text{кл}}}} \frac{\Delta \varphi_{\text{кл}}}{\Delta \varphi_{\text{газ}}} \Delta \tau_{\text{газ}} = 2 \sqrt{\frac{\lambda \Delta \tau_{\text{кл}}}{\pi r c}}. \quad (7)$$

Примем приближенно $\lambda = 1$ Вт/(мК), $\rho = 2000$ кг/м³, $c = 1500$ Дж/(кг К), $\Delta \tau = 15$ с. По формуле (7) получим эквивалентную толщину поверхностного слоя $\Delta r_{\text{ЭК}} \approx 2,5$ мм, составляющую примерно сотую долю от толщины стен печи.

Поскольку толщина слоя с нестационарной температурой сравнительно мала, можно полагать, что теплота, аккумулируемая им в пределах одного оборота печи, слабо влияет на распределение температуры по толщине стен печи в целом. Подставив выражение (7) для эквивалентной толщины слоя $\Delta r_{\text{ЭК}}$ в равенство (3), получим приближенную расчетную формулу для плотности дополнительного теплового потока через поверхность расчетного участка стены, возникающего из-за нестационарности процесса:

$$q_{\text{нст}} \approx 2 \sqrt{\frac{\lambda r c}{\pi \Delta \tau_{\text{кл}}}} \frac{\Delta \tau_{\text{кл}}}{\Delta \tau_l} (T_{l+1} - T_l) = 2b_{\text{кл}} \frac{\Delta \varphi_{\text{кл}}}{\Delta \varphi_l} (T_{l+1} - T_l) \quad (8)$$

Для оценки величины отводимого теплового потока использовано приближенное равенство

$$q_{\text{отв}} \approx k(T_{0,l} - T_{\text{в}}), \quad (9)$$

где $T_{\text{в}}$ – температура атмосферного воздуха, k – коэффициент теплопередачи через стены:

$$k = 1 / \left[\sum (\delta_i / \lambda_i) + 1 / \alpha_{\text{в}} \right].$$

δ_i – толщина i -го слоя футеровки, $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от корпуса печи к воздуху.

Основной недостаток примененного аналитического подхода состоит в упрощенной оценке величины отводимого теплового потока (9).

Проверка адекватности упрощенного аналитического подхода.

Для разработанной математической модели процессов горения и теплообмена в цементной вращающейся печи составлена компьютерная программа и выполнен численный эксперимент [3] с использованием формулы (8) при расчете температуры стен. Вычисления выполнены для печи мокрого способа производства с диаметром корпуса 5 м, толщиной хромомagneзитовой футеровки 230 мм и минимальной расчетной толщиной слоя клинкерной обмазки 20 мм, предохраняющей футеровку от разрушения. Полученные результаты представлены на рис. 2 сплошными линиями.

Температурные кривые построены для тех поперечных сечений печи, в которых температура

клинкера приближенно равна 1300 и 1450 °С. Так как слой клинкера, перемещаясь вдоль печи, сначала нагревается в зоне спекания, а затем, охлаждается, то выбранные значения его температуры соответствуют четырем поперечным сечениям. В зоне спекания внутренняя поверхность стен печи при выходе из-под слоя клинкера нагревается газами до температуры большей, чем температура клинкера, а в зоне его охлаждения – наоборот, температура поверхности стен становится ниже температуры слоя клинкера.

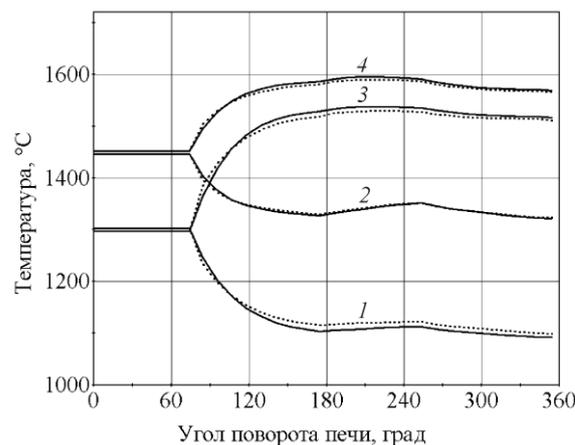


Рис. 2. Изменение температуры внутренней поверхности клинкерной обмазки в поперечных сечениях печи в зонах охлаждения (1, 2) и спекания (3, 4) клинкера, линии – по формулам (8), (9), пунктир – численное решение уравнения (2)

На рис. 2 видно, что внутренняя поверхность стен печи при попадании под слой материала испытывает значительные температурные скачки, превышающие 200 К в менее горячих частях печи. По мере приближения к поперечному сечению печи с наиболее горячим клинкером величина температурных скачков уменьшается.

Достоверность результатов, полученных по упрощенному аналитическому подходу, проверена путем численного решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности (2) по толщине стены при сохранении неизменным температурного поля, определенного в численном эксперименте для газообразной среды. При этом в граничные условия задачи вводилось известное приближенное значение температуры $T_{0,l}$ внутренней поверхности слоя клинкерной обмазки, что обеспечило устойчивую сходимость итераций и позволило найти с высокой точностью температуру $T_{l,l}$ в ближайшем к поверхности узле сетки.

В результате появилась возможность рассчитать поток отводимого тепла по более точному выражению (4), ввести его значение в уравнение (1) баланса тепловых потоков и вычислить более точное значение температуры поверхности $T_{0,l}$. Такой алгоритм расчета повторялся многократно

до тех пор, пока отличие вычисленной температуры от ее значения в предыдущей итерации не становилось менее 0,00001 определяемой величины. Достоверность расчетной температуры внутренней поверхности стен печи в данном случае не вызывает сомнений.

Результаты расчета температуры на поверхности слоя клинкерной обмазки по уточненному численному методу, изображенные на рис. 2 пунктирными линиями, близки к кривым, полученным на основе упрощенного аналитического подхода. Отклонение сплошных линий от пунктирных составляет, как правило, менее 10 °С, что подтверждает адекватность упрощенного аналитического подхода в пределах погрешности инженерных расчетов.

Результаты расчета по уточненному алгоритму показывают особенности неизоэтермического распределения температуры по толщине стен. На рис. 3 представлены кривые изменения температуры по толщине слоя клинкерной обмазки, охлаждаемой (рис. 3, а) и нагреваемой газами (рис. 3, б). В зоне охлаждения поверхностные слои стен, попадая под слой клинкера, нагреваются, а в зоне спекания клинкера, наоборот, охлаждаются (кривые 4...6).

После выхода из-под слоя клинкера (кривые 1...3) температурная кривая 1 приобретает сложную волнообразную форму на фоне теплоотдачи к газам тепла, аккумулированного стенами. При всем многообразии форм температурных кривых, представленных на рис. 3, влияние нестационарности, вызывающей колебание температуры внутри стен вращающейся печи, распространяется на относительно небольшую толщину клинкерной обмазки, практически не превышающую 12 мм, оставляя неизменной температуру по толщине футеровки.

Таким образом, при численном моделировании процессов горения и теплообмена в цементных вращающихся печах допустим упрощенный аналитический подход к учету нестационарности теплообмена. Для определения распределения температуры по толщине стен печи возможно численное решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при сохранении неизменным температурного поля, определенного в численном эксперименте для газообразной среды.

Выводы

1. В математической модели теплообмена разработан упрощенный аналитический подход к расчету нестационарной температуры стен вращающейся печи, обеспечивающий достоверность результатов в пределах погрешности инженерных расчетов.

2. Стены цементной вращающейся печи испытывают значительные температурные напря-

жения при скачкообразном изменении температуры, превышающем 200 °С при входе их под слой клинкера..

3. Нестационарное изменение температуры распространяется на сравнительно тонкий поверхностный слой, находящийся, как правило, в пределах защитной клинкерной обмазки.

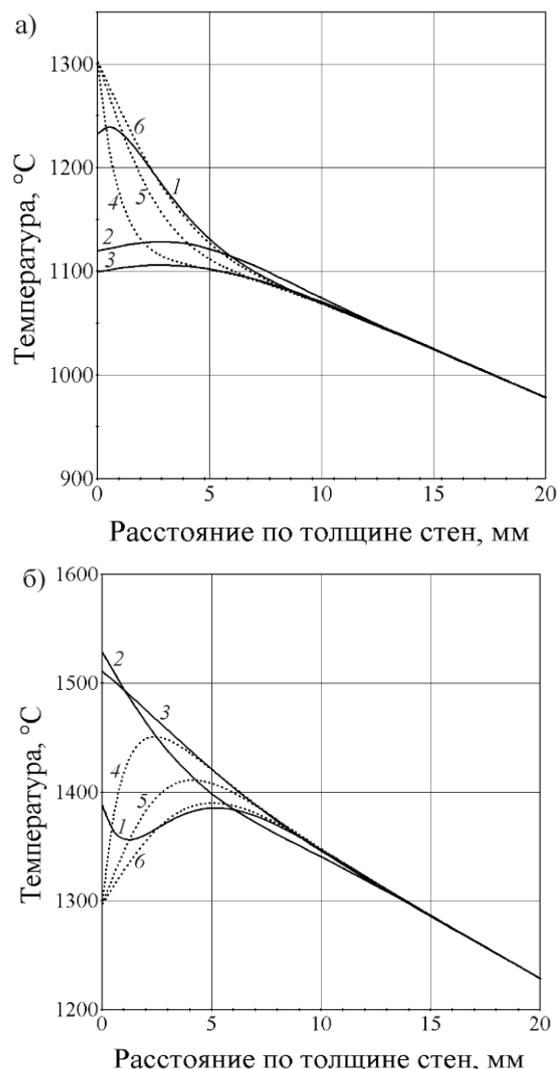


Рис. 3. Температура в слое клинкерной обмазки в зоне охлаждения (а) и спекания (б) клинкера: 1 - 3 – при контакте с газами, 4 - 6 – под слоем клинкера

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рязанцев О.А., Кузнецов В.А., Трубаев П.А. Математическая модель теплообмена во вращающейся печи с учетом переизлучения // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-23. Т. 8. – Саратов, 2010. – С. 87 - 89.
2. Шорин С. Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 487 с.
3. Кузнецов В.А., Рязанцев О.А., Трулёв А. В. Численное моделирование горения и теплообмена в цементной вращающейся печи // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. – С. 161 - 164.