

Решение задачи параметрической оптимизации теплового ограждения печей для сушки зернистого материала

Парамонов А. М., доктор техн. наук

Омский государственный технический университет

Рассмотрена задача оптимизации многослойной футеровки вращающихся печей, состоящей из слоев различной толщины и выполненной из материалов с отличающимися физико-химическими свойствами. Получено решение, позволяющее определять экономически наиболее выгодную толщину стенки при оптимальной последовательности расположения огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Предложенный алгоритм дает возможность оценить различные сочетания параметров многослойной футеровки и оптимизировать ее при заданных ограничениях.

Ключевые слова: футеровка, оптимизация, огнеупорные материалы, теплоизоляционные материалы, печь.

Актуальность активного энергосбережения в таком энергоемком теплотехнологическом процессе, как сушка, обусловлена неоправданным ростом энергоемкости единицы промышленной продукции. Возможная экономия топливно-энергетических ресурсов (в пересчете на условное топливо) в сушильных установках составляет десятки миллионов тонн, что определяется широким распространением этого теплотехнологического процесса во всех отраслях промышленности и большими резервами экономии энергии. Решению проблемы существенного снижения энергоемкости сушки способствуют разработка и создание высокоэффективных и экономичных сушильных установок.

Для сушки зернистого материала применяются вращающиеся печи, важным элементом конструкции которых является их футеровка. Она в значительной степени определяет стоимость, долговечность и энергопотребление печного агрегата. Одно из главных тре-

бований, предъявляемых к футеровке печи, — ее стойкость к воздействиям переменных во времени высоких температур, пыли и газов. Подводимую к футеровке со стороны рабочего пространства печи теплоту можно разделить на две составляющие: на аккумуляцию и на покрытие (компенсацию) тепловых потерь теплопроводностью в окружающую среду. Согласно литературным данным эти потери составляют от 14 до 41 % всех потерь [1] теплоты.

Таким образом, потери теплоты через футеровку и, как следствие, расход топлива на покрытие этих потерь значительны. При увеличении толщины футеровки потери теплоты теплопроводностью уменьшаются, но возрастает расход теплоты на аккумуляцию, увеличиваются капитальные вложения и эксплуатационные затраты на тепловое ограждение печи. Поэтому актуальна оптимизация футеровки печи с учетом ее теплоиспользующих, эксплуатационных и стоимостных характери-

стик. Она предполагает применение различных огнеупорных и теплоизоляционных материалов с разной толщиной рабочего и внутренних слоев.

В данной статье с целью оптимизации футеровки печи рассматривается многослойная стенка, состоящая из слоев различной толщины, выполненных из материалов с отличающимися физико-техническими свойствами (плотностью, рабочей температурой эксплуатации, аккумулярующей способностью, теплопроводностью). Задачи исследования:

определение экономически наиболее выгодной толщины футеровки, обеспечивающей минимум затрат на ее изготовление и эксплуатацию;

нахождение и выбор оптимальной последовательности расположения огнеупорных и теплоизоляционных материалов и оптимальной толщины отдельных слоев.

Объекты исследования — печи, температурное поле футеровки которых стационарно и пространственно неоднородно. Нулевым координатам соответствует внутренняя поверхность футеровки рабочего пространства печи температурой $t_{кл}$, конечным координатам — наружная поверхность футеровки температурой $t_{нар}$. Влияние футеровки печи на себестоимость тепловой обработки продукции выражается через стоимость топлива на компенсацию потерь теплоты теплопроводностью в окружающую среду и его расход на аккумуляцию в периоды пусков из холодного состояния. Конструкция футеровки (толщина, применяемые огнеупорные и теплоизоляционные материалы, число огнеупорных и теплоизоляционных слоев) определяет ее стоимость, потери теплоты и расход топлива, уменьшая или увеличивая эту составляющую в себестоимости тепловой обработки материала.

Рассмотрим баланс теплоты печи при условии, что продукты сгорания топлива (газы) полностью отводятся из печи [2]. Выразим расход топлива B на поддержание заданного температурного режима печи как величину из трех составляющих: на тепловую обработку материала B_M , на компенсацию потерь теплоты через теплое ограждение $B_{ог}$, на компенсацию прочих потерь теплоты $B_{пр}$:

$$B = \frac{Q_M + Q_{ог} + Q_{пр}}{q_{x,ф} + I_B^n - I^n - q_{x,н}} = \frac{Q_M}{Q_T} + \frac{Q_{ог}}{Q_T} + \frac{Q_{пр}}{Q_T} = B_M + B_{ог} + B_{пр}, \quad (1)$$

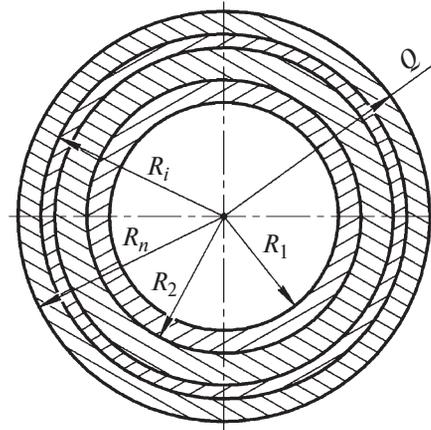
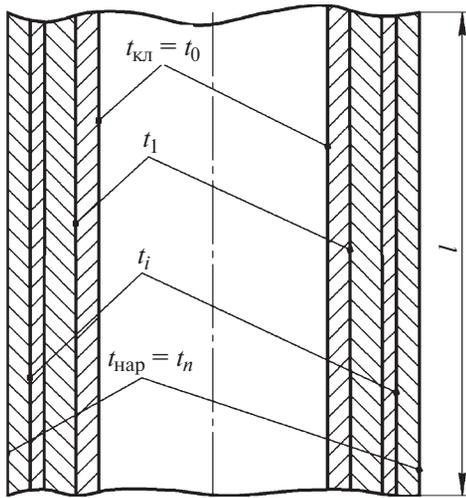
где Q_M , $Q_{ог}$, $Q_{пр}$ — усредненные по длине потоки теплоты в материал, тепловые ограждения и прочие устройства (окна, водоохлаждаемые элементы и др.), Вт; $q_{x,ф}$ — химическая (низшая теплота сгорания) и физическая теплота топлива, Дж/кг(м³); I_B^n , I^n — энтальпии подогретого воздуха, идущего на горение топлива, и уходящих газов как функции от коэффициента избытка воздуха и соответствующих температур, Дж/кг(м³) топлива; $q_{x,н}$ — теплота химического недожога топлива, Дж/кг(м³); $Q_T = q_{x,ф} + I_B^n - I^n - q_{x,н}$ — теплота газов на входе и выходе из зон печи.

Сравнительный анализ показывает, что составляющие теплового баланса печи изменяются пропорционально изменению расхода топлива на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду через футеровку печи. Поэтому без ущерба для точности решения задачи рассмотрим из уравнения баланса только тепловые потери через футеровку теплопроводностью и на аккумуляцию в период пусков печи из холодного состояния. Анализ энергосбережения проведем, определяя изменение расхода топлива численным дифференцированием. В качестве критерия оптимальности принята оценка сравнительной экономической эффективности капитальных вложений в предлагаемых вариантах по минимуму дисконтированных затрат.

Дисконтированные затраты на футеровку печи [3] включают в себя годовые эксплуатационные расходы, отчисления на амортизацию и капитальные вложения в изготовление футеровки печи:

$$Z = (C_T B + S_{ам}) + P_n K = (C_T B + ПK) + P_n K, \quad (2)$$

где C_T — стоимость топлива, включающая его рыночную цену и затраты на транспортировку, хранение, подготовку к сжиганию, руб/кг (руб/м³); $B = (3,6Q_T h + Q_a N)/Q_T$ — расход топлива на компенсацию тепловых потерь теплопроводностью через кладку и на аккумуляцию его теплоты в период разогревов (пусков), кг/год (м³/год); Q_T — тепловые потери теплопроводностью через футеровку, кДж/ч; h — продолжительность использования установленной мощности печи, ч/год; Q_a — потери теплоты на аккумуляцию, кДж; N — число пусков в работу печи после длительных ее остановок (из холодного состояния), год⁻¹; $S_{ам}$ — затраты на амортизацию, руб/год; $П$ — норма амортизационных отчислений, год⁻¹; K — стоимость изготовления футеровки печи, руб.;



P_H — норма дисконта инвестиций, год^{-1} , т. е. нормативный показатель, характеризующий экономию средств, приходящуюся на 1 руб. капитальных вложений.

С учетом формулы для определения расхода топлива B выражение (2) примет вид:

$$Z = \frac{C_T}{Q_T} (3,6 Q_T h + Q_a N) + (П + P_H) K. \quad (3)$$

Чтобы получить расчетное выражение для оптимальной толщины футеровки печи, необходимо представить величины Q_T , Q_a и K как функции указанного аргумента.

Уравнение для расчета расхода теплоты, W_T , теплопроводностью через n -слойную цилиндрическую стенку (см. рисунок) [4] выглядит следующим образом:

$$Q_T = \frac{2\pi l(t_{\text{кл}} - t_{\text{в}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} R_n}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{в}}$ — температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{кл}}$ — температура внутренней поверхности футеровки, $^{\circ}\text{C}$; R_i , R_{i+1} — внутренний и наружный радиусы i -го слоя футеровки, м; l — длина участка футеровки, м; λ_i — теплопроводность материала i -го слоя футеровки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\alpha_{\text{нар}}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности футеровки печи в окружающую среду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; R_n — радиус наружной поверхности футеровки, м.

Представляя тепловой поток для каждого слоя футеровки, толщину i -го слоя и общую толщину футеровки как функции толщины первого внутреннего слоя, получаем в конечном виде выражение для расчета тепловых потерь.

Тепловые потери теплопроводностью через футеровку и от обшивки (наружной поверхности) печи в окружающую среду равны. Исходя из заданной температуры на наружной поверхности футеровки $t_{\text{нар}}$, определим суммарную теплоотдачу от нее к окружающему воздуху как теплоотдачу конвекцией и излучением.

При стационарном тепловом режиме работы печи через все слои проходит одно и то же количество теплоты. Следовательно,

$$\begin{aligned} q_1 l = q_2 l = q_3 l = \dots = q_i l = q_n l; \\ q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_i = q_n, \end{aligned} \quad (5)$$

где q_i — плотность теплового потока i -го слоя футеровки, $\text{Вт}/\text{м}^2$; l — длина цилиндрической стенки футеровки печи, м.

В соответствии с рисунком запишем граничные условия для теплового потока:

$$\begin{aligned} t = t_{\text{кл}} = t_0 \text{ при } x = 0; \quad t = t_1 \text{ при } x = \delta_1; \\ \delta_1 = R_2 - R_1; \dots; \quad t = t_i \text{ при } x = \delta_i; \\ \delta_i = R_{i+1} - R_i; \dots; \quad t = t_{\text{нар}} = t_n \text{ при } x = \delta_n; \\ \delta_n = R_n - R_{n-1}. \end{aligned}$$

Вводя в уравнение (4) толщину слоя футеровки и учитывая равенства (5), уравнения тепловых потоков для i -х слоев футеровки можно привести к виду:

$$\begin{aligned} Q_T &= \frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \left(1 + \frac{\delta_1}{R_1} \right)} = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \left(1 + \frac{\delta_2}{R_2} \right)} = \\ &= K \frac{2\pi l(t_{i-1} - t_i)}{\frac{1}{\lambda_i} \ln \left(1 + \frac{\delta_i}{R_i} \right)} = K \frac{2\pi l(t_{n-1} - t_n)}{\frac{1}{\lambda_n} \ln \left(1 + \frac{\delta_n}{R_n} \right)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где δ_i — толщина i -го слоя футеровки, м; t_0 — температура внутренней поверхности футеровки, °C; t_1, t_2, \dots, t_i — температуры внешних поверхностей соответственно 1-го, 2-го, ..., i -го слоев футеровки, °C; t_n — температура внешней поверхности футеровки, °C; R_1, R_2, \dots, R_i — внутренние радиусы соответственно 1-го, 2-го, ..., i -го слоя футеровки, м; λ_i — теплопроводность материала i -го слоя футеровки, Вт/(м · К).

Представляя общую толщину футеровки печи δ_Σ в виде функции толщины первого огнеупорного слоя δ_1 и внутреннего радиуса первого слоя футеровки R_1 , а также используя свойство алгоритмов [5], после преобразования уравнения (6) получаем выражение для $\delta_\Sigma = f(\delta_1, R_1)$:

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^n R_i \left[\left(1 + \frac{\delta_1}{R_1} \right)^{\frac{\lambda_i (t_{i-1} - t_i)}{\lambda_1 (t_0 - t_1)}} - 1 \right]. \quad (7)$$

Подставив в уравнение (4) выражение (7), получим формулу для определения потерь теплоты теплопроводностью через кладку печи, когда $Q_T = f(\delta_1, R_1)$:

$$\left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n R_i \left[\left(1 + \frac{\delta_1}{R_1} \right)^{\frac{\lambda_i (t_{i-1} - t_i)}{\lambda_1 (t_0 - t_1)}} - 1 \right]}{R_i} \right] + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} R_n} \right\}. \quad (8)$$

Расход теплоты футеровкой на аккумуляцию

$$Q_a = \sum_{i=1}^n [V_i \rho_i (C_i^K t_i^K - C_i^H t_i^H)], \quad (9)$$

где V_i и ρ_i — объем и плотность материала i -го слоя футеровки; t_i^H и t_i^K — начальная (в момент пуска печи в работу) и конечная температуры i -го слоя футеровки, °C; C_i^H и C_i^K — средние теплоемкости материала i -го слоя футеровки при начальной и конечной его температурах, кДж/(кг · К).

Объем i -го слоя футеровки печи

$$V_i = \pi R_i^2 l - \pi R_{i-1}^2 l = \pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2). \quad (10)$$

Капитальные затраты на изготовление футеровки печи

$$K = \sum_{i=1}^n (V_i S_i), \quad (11)$$

где S_i — стоимость материала i -го слоя футеровки печи, включающая стоимость единицы количества материала i -го слоя футеровки, стоимость его монтажа и прочие затраты (накладные расходы, плановые накопления и другие), руб/м³.

Подставив в уравнение (3) выражения (8), (9), (11), получим формулу для определения совокупных затрат на футеровку печи:

$$\begin{aligned} & Z = \frac{C_T}{Q_T} \left\{ 7,2 \pi l (t_{\text{кл}} - t_B) h / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \ln \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n R_i \left[\left(1 + \frac{\delta_1}{R_1} \right)^{\frac{\lambda_i (t_{i-1} - t_i)}{\lambda_1 (t_0 - t_1)}} - 1 \right]}{R_i} \right] + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} R_n} \right) + \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n [\rho_i \pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2) (C_i^K t_i^K - C_i^H t_i^H)] N \right\} + \\ & + (\Pi + P_H) \sum_{i=1}^n [\pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2) (\rho_i S_{i1} + S_{i2} + S_{i3})]. \quad (12) \end{aligned}$$

Разработанный алгоритм позволяет рассчитать оптимальную толщину футеровки печи при оптимальной последовательности расположения огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. Аббакумов В. Г., Новиков В. Л. Методы оптимизации конструкции многослойных печных футеровок. — Огнеупоры, 1983, № 7.
2. Соколов А. К. К выбору экономичной тепловой изоляции зон топливной секционной печи. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2008, № 5.
3. Зайцев Н. Л. Экономика организации. — М.: Экзамен, 2004.
4. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник / Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1979.
5. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. — М.: АСТ Астрель, 2006.