УДК 620.97

А. М. ПАРАМОНОВ
А. В. КУШНАРЕНКО
В. Н. ГОРЮНОВ
И. А. ХОЛМЯНСКИЙ

Омский государственный технический университет

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУТЕРОВКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Рассматривается 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 позволяет оптимизировать ее при заданных ограничениях.

Ключевые слова: футеровка, оптимизация, огнеупорные материалы, теплоизоляционные материалы, вращающиеся печи.

Футеровка вращающихся печей является важным элементом их конструкции. Она в значительной степени определяет стоимость, долговечность и энергопотребление печного агрегата. Например, одним из главных требований, предъявляемых к футеровке печи, является ее стойкость к воздействиям переменных во времени высоких температур, агрессивному действию пыли, газов. Тепло, подводимое к футеровке со стороны рабочего пространства печи, можно разделить на две составляющие: на аккумуляцию и на покрытие (компенсацию) тепловых потерь теплопроводностью в окружающую среду. Согласно имеющимся литературным данным эти потери теплоты составляют от 14 до 41 % всех потерь [1]. Таким образом, потери теплоты через футеровку и, как следствие, расход топлива на покрытие этих потерь значительны. При увеличении ее толщины потери теплоты теплопроводностью снижаются, но возрастают тепловые потери на аккумуляцию, увеличиваются капитальные затраты и эксплуатационные расходы на тепловое ограждение печи. Поэтому актуальным является решение задачи оптимизации футеровки печи с учетом ее теплоиспользующих, эксплуатационных и стоимостных характеристик. Оптимизация футеровки печи предполагает варьирование качеством применяемых огнеупорных и теплоизоляционных материалов, толщиной рабочего и внутренних слоев. Все перечисленные параметры — факторы оптимизации.

Задачи оптимизации:

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

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

Рассмотрим баланс теплоты печи при условии, что продукты сгорания топлива (газы) отводятся из печи [1]:

$$B(q_{x.ф} + I_в'' - I'' - q_{x.н}) = Q_м + Q_{ог} + Q_{пр}, \qquad (1)$$

и выразим из него расход топлива на поддержание заданного температурного режима печи:

$$B = \frac{Q_м + Q_{ог} + Q_{пр}}{q_{x.ф} + I_в'' - I'' - q_{x.н}}, \qquad (2)$$

где $Q_м$, $Q_{ог}$, $Q_{пр}$ — 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(м^3);
$I_в''$, I'' — энтальпии подогретого воздуха на горение и уходящих газов, как функции коэффициента избытка воздуха и соответствующих температур, Дж/ кг(м^3) топлива;
$q_{x.н}$ — теплота химического недожога, Дж/ кг(м^3) топлива.

Расход топлива можно разделить на три составляющие:

$$B = \frac{Q_м}{Q_г} + \frac{Q_{ог}}{Q_г} + \frac{Q_{пр}}{Q_г} = B_м + B_{ог} + B_{пр}, \qquad (3)$$

где $Q_г = q_{x.ф} + I_в'' - I'' - q_{x.н}$ — теплота, которую оставляют газы.

Из уравнения (3) выделим расход топлива на компенсацию потерь теплоты через тепловое ограждение.

$$B_{ог} = \frac{Q_{ог}}{Q_г}. \qquad (4)$$

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 поставленной задачи рассмотрим из уравнения баланса теплоты 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 сравниваемые варианты по минимуму дисконтированных затрат.

Дисконтированные затраты на футеровку печи [2]:

$$З = C + P_н K, \qquad (5)$$

где C — годовые расходы, связанные с эксплуатацией футеровки, руб./год;
K — стоимость изготовления футеровки печи, руб.;
$P_н$ — нормативный коэффициент эффективности, 1/год.

$$C = S_T + S_{ам}, \qquad (6)$$

S_T — приведенные годовые затраты на топливо, руб./год;

$$S_T = C_T + C_T B, \qquad (7)$$

C_T — годовая стоимость топлива, включающая рыночную его стоимость и затраты на транспортировку, хранение, подготовку к сжиганию, руб./кг ($м^3$);
B — расход топлива на компенсацию тепловых потерь теплопроводностью через кладку и на аккумуляцию его тепла в период разогревов (пусков), кг($м^3$)/год.

Из уравнения (4):

$$B = \frac{Q_т h + Q_a N}{Q_г}, \qquad (8)$$

$Q_т$ — тепловые потери теплопроводностью через кладку, кДж/ч;
h — время использования установленной мощности печи, ч/год;
Q_a — потери теплоты на аккумуляцию, кДж;
N — частота (количество) пусков в работу печи после длительных ее остановок (из холодного состояния), 1/год;
$S_{ам}$ — затраты на амортизацию, руб./год;

$$S_{ам} = ПК, \qquad (9)$$

$П$ — норма амортизационных отчислений, 1/год;

С учетом выражений (6) – (9) выражение (5) примет вид:

$$З = \frac{C_T}{Q_г}(Q_т h + Q_a N) + (П + P_н)K. \qquad (10)$$

Для того, чтобы получить расчетное выражение для оптимальной толщины футеровки печи, необходимо представить $Q_т$, Q_a и K как функции от указанного аргумента.

Уравнение для расхода тепла теплопроводностью через n-слойную цилиндрическую стенку, Вт [3]:

$$Q_т = \frac{2\pi l(t_{кл} - t_в)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i} + \frac{1}{\alpha_{нар} R_n}}, \qquad (11)$$

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

Представляя тепловой поток для каждого из слоев футеровки, толщину i-го слоя и общую толщину футеровки как функцию от толщины первого внутреннего огнеупорного слоя, получаем в конечном виде выражение для тепловых потерь.

Тепловые потери теплопроводностью через футеровку и от обшивки (наружной поверхности) печи в окружающую среду равны:

$$Q = \alpha_{нар}(t_{нар} - t_в), \quad Q = Q_т; \qquad (12)$$

где $t_{нар}$ — температура наружной поверхности футеровки, °С.

Исходя из заданной температуры на наружной поверхности футеровки $t_{нар}$, рассматривается суммарная теплоотдача от нее к окружающему воздуху как теплоотдача конвекцией и излучением:

$$\alpha_{нар} = \alpha_{нар} + \alpha_и; \qquad (13)$$

где $\alpha_{нар}$, $\alpha_и$ — соответственно коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/($м^2$·К).

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

Следовательно,

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = ... = Q_i = Q_n; \qquad (14)$$

$$q_1 l = q_2 l = q_3 l = ... = q_i l = q_n l;$$
$$q_1 = q_2 = q_3 = ... = q_i = q_n, \qquad (15)$$

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

В соответствии с рис. 1 запишем граничные условия для теплового потока:

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

Согласно (15), уравнения тепловых потоков для i-х слоев футеровки могут быть приведены к виду:

$$Q_т = \frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{R_3}{R_2}} = \mathbf{K}$$

$$\mathbf{K} = \frac{2\pi l(t_{i-1} - t_i)}{\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}} = \mathbf{K} \frac{2\pi l(t_{n-1} - t_n)}{\frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{R_n}{R_{n-1}}}; \qquad (16)$$

Вводя в уравнение (16) толщину слоя, получим:

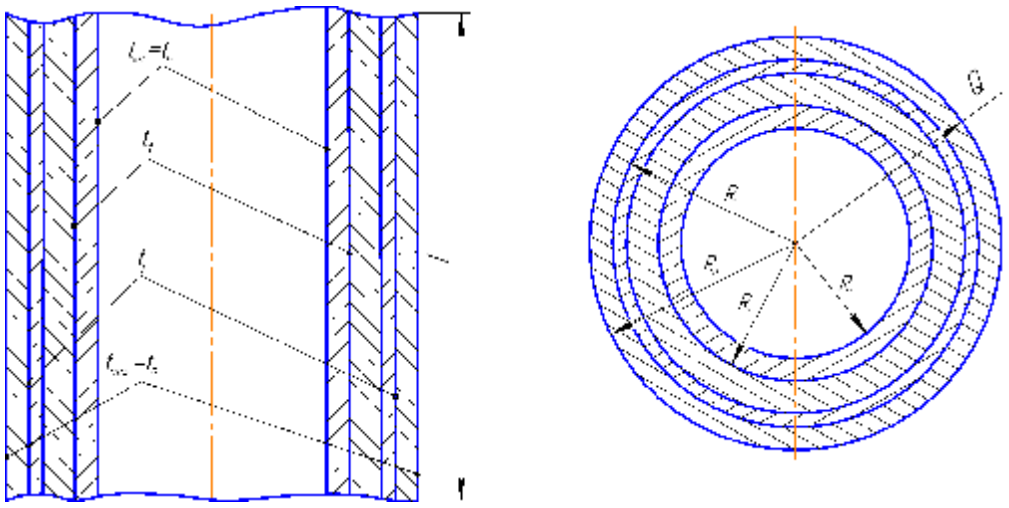


Рис. 1. Расчетная схема футеровки

$$Q_m = \frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_2}\ln\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right)} = \mathbf{K}$$

$$\mathbf{K} = \frac{2\pi l(t_{i-1} - t_i)}{\frac{1}{\lambda_i}\ln\left(1+\frac{\delta_i}{R_i}\right)} = \mathbf{K}\frac{2\pi l(t_{n-1} - t_n)}{\frac{1}{\lambda_n}\ln\left(1+\frac{\delta_n}{R_n}\right)}; \qquad \textbf{(17)}$$

где δ_i — толщина i-го слоя футеровки, м;
t_0 — температура внутренней поверхности футеровки, °С;
t_1, t_2, ... t_i — соответственно температура внешней поверхности 1-го, 2-го, i-го слоев футеровки, °С;
t_n — температура внешней поверхности футеровки, °С;
R_1, R_2, R_3, R_i — соответственно внутренние радиусы 1-го, 2-го, 3-го, i-го слоя футеровки, м;
λ_i — коэффициент теплопроводности материала i-го слоя футеровки, Вт/(м·К).

Представим толщину i-го слоя δ_i и общую толщину футеровки печи δ_Σ в виде функции от толщины первого огнеупорного слоя:

$$\delta_i = f(\delta_1, R_1), \quad \delta_\Sigma = f(\delta_1, R_1);$$

$$\frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_2}\ln\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right)};$$

$$\frac{\ln\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right)}{\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\frac{(t_1 - t_2)}{(t_0 - t_1)};$$

Согласно свойствам логарифмов [4], получим:

$$\log_{\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)}\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\frac{(t_1 - t_2)}{(t_0 - t_1)},$$

$$\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right) = \left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\frac{(t_1 - t_2)}{(t_0 - t_1)}},$$

$$\frac{\delta_2}{R_2} = \left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\frac{(t_1 - t_2)}{(t_0 - t_1)}} - 1.$$

То есть

$$\frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{2\pi l(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_2}\ln\left(1+\frac{\delta_2}{R_2}\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\delta_2}{R_2} = \left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\frac{(t_1 - t_2)}{(t_0 - t_1)}} - 1; \qquad \textbf{(18)}$$

$$\frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{2\pi l(t_2 - t_3)}{\frac{1}{\lambda_3}\ln\left(1+\frac{\delta_3}{R_3}\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\delta_3}{R_3} = \left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\frac{(t_2 - t_3)}{(t_0 - t_1)}} - 1; \qquad \textbf{(19)}$$

$$\frac{2\pi l(t_0 - t_1)}{\frac{1}{\lambda_1}\ln\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)} = \frac{2\pi l(t_{i-1} - t_i)}{\frac{1}{\lambda_i}\ln\left(1+\frac{\delta_i}{R_i}\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\delta_i}{R_i} = \left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\frac{(t_{i-1} - t_i)}{(t_0 - t_1)}} - 1. \qquad \textbf{(20)}$$

Используя выражение (20), получим $\delta_\Sigma = f(\delta_1, R_1)$:

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} R_i\left[\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\frac{(t_{i-1} - t_i)}{(t_0 - t_1)}} - 1\right]. \qquad \textbf{(21)}$$

Подставив в уравнение (11) выражение (21), получим выражение для определения потерь тепла теплопроводностью через кладку печи, когда $Q_m = f(\delta_1, R_1)$:

$$Q_m = \frac{2\pi l(t_{кл} - t_в)}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\lambda_i}\ln\left(1+\frac{\sum_{i=1}^{n} R_i\left[\left(1+\frac{\delta_1}{R_1}\right)^{\frac{\lambda_i}{\lambda_1}\frac{(t_{i-1} - t_i)}{(t_0 - t_1)}} - 1\right]}{R_i}\right) + \frac{1}{\alpha_{нар}R_n}}. \qquad \textbf{(22)}$$

Аккумуляция тепла футеровкой определяется из выражения:

$$Q_a = \sum_{i=1}^{n} \left[V_i \rho_i \left(C_i^к t_i^к - C_i^н t_i^н \right) \right], \quad \textbf{(23)}$$

где V_i, ρ_i — соответственно объем и плотность материала i-го слоя футеровки;
$t_i^н$, $t_i^к$ — соответственно начальная (в момент пуска печи в работу) и конечная температура i-го слоя футеровки, °С;
$C_i^н$, $C_i^к$ — средняя теплоемкость материала i-го слоя футеровки, при начальной и конечной его температуре, кДж/(кг·К).

Объем i-го слоя футеровки печи:

$$V_i = \pi R_i^2 l - \pi R_{i-1}^2 l = \pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2). \quad \textbf{(24)}$$

Полные капитальные затраты на изготовление футеровки печи:

$$K = \sum_{i=1}^{n} (V_i S_i), \quad \textbf{(25)}$$

где S_i — стоимость материала i-го слоя футеровки печи, руб./м^3,

$$S_{i1} = \rho_i S_{i1} + S_{i2} + S_{i3}, \quad \textbf{(26)}$$

S_{i1} — стоимость единицы массы материала i-го слоя футеровки, руб./т;
S_{i2} — стоимость монтажа единицы объема материала i-го слоя футеровки, руб./м^3;
S_{i3} — прочие затраты изготовления i-го слоя футеровки (накладные расходы, плановые накопления и другие), руб./м^3.

Подставив в уравнение (10) выражения (22), (23), (25), получим формулу для определения совокупных затрат на футеровку печи:

$$З = \frac{C_т}{Q_r} \left(\frac{2\pi l (t_{кл} - t_в) h}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i \left[\left(1 + \frac{\delta_1}{R_1} \right)^{\frac{\lambda_i (t_{i-1} - t_i)}{\lambda_1 (t_0 - t_1)}} - 1 \right]}{R_i} \right)} \rightarrow \right.$$

$$\left. \rightarrow \frac{1}{\alpha_{нар} R_n} \right) +$$

$$+ \sum_{i=1}^{n} \left[\rho_i \pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2) \left(C_i^к t_i^к - C_i^н t_i^н \right) \right] \cdot N) +$$

$$+ (П + P_н) \sum_{i=1}^{n} \left[\pi l (R_i^2 - R_{i-1}^2) (\rho_i S_{i1} + S_{i2} + S_{i3}) \right]. \quad \textbf{(27)}$$

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

Библиографический список

1. Соколов, А. К. К выбору экономичной тепловой изоляции зон топливной секционной печи / А. К. Соколов // Известия высших учебных заведений. Сер. Черная металлургия. – 2008.– № 5. – С. 35–38.

2. Зайцев, Н. Л. Экономика организации / Н. Л. Зайцев. – М. : Экзамен, 2004. – 624 с.

3. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник / Х. Уонг ; пер. с англ. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.

4. Выгодский, М. Я. Справочник по элементарной математике / М. Я. Выгодский. – М. : АСТ Астрель, 2006. – 509 с.

ПАРАМОНОВ Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).
КУШНАРЕНКО Антон Вячеславович, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ.
ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», декан энергетического института ОмГТУ.
ХОЛМЯНСКИЙ Игорь Антонович, доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.
Адрес для переписки: amparamonov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.02.2012 г.

© А. М. Парамонов, А. В. Кушнаренко, В. Н. Горюнов, И. А. Холмянский

Книжная полка

Кудрин, Б. И. Системы электроснабжения : учеб. пособие для вузов по специальности «Электроснабжение» направления подгот. «Электроэнергетика» / Б. И. Кудрин. – М. : Академия, 2011. – 350 с. – ISBN 978-5-7695-6789-6.

Дана общая характеристика системы электроснабжения до и более 1 кВ. Приведены способы расчета электрических нагрузок, токов короткого замыкания, выбор аппаратов и сетей, особенности пуска и самозапуска электродвигателей. Описаны особенности транспорта электрической энергии по территории и цехам. Изложены вопросы электроснабжения, компенсация реактивной мощности, требования к качеству электроэнергии. Освещены особенности инвестиционного проектирования электротехнической части. Разъяснены изменения, произошедшие в связи с реструктуризацией электроэнергетики. Приведенная теория и практика электрообеспечения потребителей позволяет говорить об основах систем электроснабжения как области технической деятельности.