

заданы различными способами. В данной работе выбраны граничные условия первого рода. Заданы температуры на низших поверхностях слоя футеровки в форме полубесконечной стенки, по поверхности стенки граничные условия приняты однородными и не зависящими от времени (стационарный тепловой режим).

Процесс переноса теплоты через двухслойную футеровку при наличии газового объема имеет следующие особенности. Перенос теплоты через монолитную часть осуществляется только механизмом молекулярной теплопроводности. Наличие газовой полости приводит к тому, что одновременно имеют место два механизма передачи теплоты: молекулярная теплопроводность через слой газа и теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух поверхностей и заполненной излучающей и поглощающей средой. При расчете теплообмена излучением необходимо учитывать температуру поверхностей, форму и размеры этих поверхностей, их оптические характеристики, а также радиационные характеристики — степени черноты поверхностей. Что касается собственного излучения газа в полости, то в первом приближении им можно пренебречь, учитывая малые объемы полости.

С точки зрения расчета потерь теплоты через футеровку в ней можно выделить три области, которые отражены пунктиром на рис. 1. В областях I и III осуществляется только механизм теплопроводности, в области II одна часть теплоты переносится излучением, а другая — теплопроводностью через газовый объем.

Для областей I и II характерны величины: T_1, T_2, T_3 — температуры поверхности со стороны рабочего пространства печи, на границе первого и второго слоев и со стороны окружающей среды; λ_1 и λ_2 — средняя теплопроводность первого и второго слоев; δ_1 и δ_2 — толщина первого и второго слоев; q — удельный поток теплоты через первый и второй слой.

Для области III характерны величины: $T_{1,i}, T_{2,i}, T_{3,i}$ — температуры поверхности со стороны рабочего пространства печи, на границе первого и второго слоев и со стороны окружающей среды; $\lambda_{1,i}, \lambda_{2,i}, \lambda_{3,i}$ — средняя теплопроводность первого, второго и третьего слоев; $\delta_{1,i}, \delta_{2,i}, \delta_{3,i}$ — толщина первого, второго и третьего слоев; ε_1 и ε_2 — степень черноты поверхностей F_2 и F_3 ; $q_{1,i}, q_{2,i}, q_{3,i}$ — удельный поток теплоты через первый, второй и третий слой.

Для решения данной задачи, как указывалось выше, были использованы граничные условия первого рода. Интенсивность процесса переноса теплоты теплопроводностью для областей I и III характеризуется следующей формулой:

$$q = \frac{T_1 - T_2 - T_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (1)$$

Теплообмен теплопроводностью через футеровку для области II можно описать следующим образом. Область II разбивается на слои раз-

мером d_i . Каждая i -я область характеризуется системой уравнений для расчета теплообмена через футеровку. Для упрощения расчетов величины по слоям осредняют.

Средняя толщина первого и третьего слоев определяется по формулам:

$$\delta_{1cp} = \frac{1}{F_2} \int_{F_3} \delta_{1,i} dF, \quad (2)$$

$$\delta_{3cp} = \frac{1}{F_3} \int_{F_3} \delta_{3,i} dF. \quad (3)$$

Средняя величина теплопроводности слоев определяется по формулам:

$$\lambda_{1cp} = \frac{\lambda_1 \cdot (T_1) + \lambda_1 \cdot (T_2)}{2}, \quad (4)$$

$$\lambda_{2cp} = \frac{\lambda_2 \cdot (T_2) + \lambda_2 \cdot (T_3)}{2}, \quad (5)$$

$$\lambda_{3cp} = \frac{\lambda_3 \cdot (T_3) + \lambda_3 \cdot (T_4)}{2}. \quad (6)$$

Толщина $\delta_{2,i}$ определяется с помощью параметра $l_{эф,i}$ — эффективной длины пути луча:

$$\delta_{2,i} = l_{эф,i}, \quad (7)$$

$$l_{эф,i} = \frac{4 \cdot m \cdot V_i}{F_i}, \quad (8)$$

где m — коэффициент, учитывающий форму тела (обычно равен 0,9); V_i — объем i -й области и F_i — поверхность i -й области.

Средняя длина пути луча по слою и осредненная толщина слоя вычисляются следующим образом:

$$l_{эф,cp} = \frac{1}{V_2} \int_{V_2} l_{эф,i} dV, \quad (9)$$

$$\delta_{эф,cp} = \frac{1}{V_2} \int_{V_2} l_{эф,i} dV. \quad (10)$$

Осредненный удельный поток передачи теплоты q_{1cp} через первый слой равен

$$q_{1cp} = \frac{\lambda_1}{\delta_{1cp}} \cdot (T_1 - T_2). \quad (11)$$

Осредненный удельный поток передачи теплоты q_{2cp} через третий слой равен

$$q_{2cp} = \frac{\lambda_3}{\delta_{3cp}} \cdot (T_3 - T_4). \quad (12)$$

Осредненный удельный поток передачи теплоты, учитывающий механизм теплопроводности q_{2cp}^T через второй слой:

$$q_{2cp}^T = \frac{\lambda_{2cp}}{\delta_{2cp}} \cdot (T_2 - T_3). \quad (13)$$

Выше был описан механизм теплопроводности области II. Но в газовой прослойке, кроме того, есть механизм передачи теплоты излучением. Введем допущение, что газовая среда, заполняющая пору, является лучепрозрачной, тогда приведенный коэффициент i -й области равен [2]:

$$C_{пр,i} = \frac{\varphi_{12}}{\left[\frac{1}{C_0} + \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_0} \right) \cdot \varphi_{12} + \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right) \cdot \varphi_{21} \right]}, \quad (14)$$

где $\varphi_{12}, \varphi_{21}$ — средние угловые коэффициенты излучения; C_0 — константа излучения абсолют-

но черного тела, $C_0 = 5,67032 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

При этом константы излучения поверхностей F_2 и F_3 :

$$C_1 = \varepsilon_1 \cdot C_0, \quad (15)$$

$$C_2 = \varepsilon_2 \cdot C_0. \quad (16)$$

При подстановке формул (15) и (16) в уравнение (14) получается следующее выражение:

$$C_{\text{пр},i} = \frac{\varphi_{12} \cdot C_0}{\left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \varphi_{21} \right]}, \quad (17)$$

где $C_{\text{пр},i}$ — приведенный коэффициент i -й области.

Осредненные по слою $\varphi_{12\text{ср}}$ и $\varphi_{21\text{ср}}$ находим следующим образом:

$$\varphi_{12\text{ср}} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \varphi_{12,i} dF, \quad (18)$$

$$\varphi_{21\text{ср}} = \frac{1}{F_2} \int_{F_2} \varphi_{21,i} dF. \quad (19)$$

С учетом вышеперечисленного находим осредненный по слою приведенный коэффициент излучения:

$$C_{\text{пр,ср}} = \frac{\varphi_{12\text{ср}} \cdot C_0}{\left[1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \varphi_{12\text{ср}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \varphi_{21\text{ср}} \right]}. \quad (20)$$

Осредненный удельный поток переноса теплоты, учитывающий механизм излучения $q_{2\text{ср}}$ через второй слой, равен:

$$q_{2\text{ср}}^{\text{изл}} = C_{\text{пр,ср}} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right). \quad (21)$$

Удельный поток теплоты через газовую прослойку (пору) имеет следующий вид:

$$q_{2\text{ср}} = q_{2\text{ср}}^{\text{Т}} + q_{2\text{ср}}^{\text{изл}} = \frac{\lambda_{2\text{ср}}}{\delta_{2\text{ср}}} \cdot (T_2 - T_3) + C_{\text{пр,ср}} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right). \quad (22)$$

Формулы (11), (12) и (22) полностью описывают теплообмен системы твердая стенка – газовый объем – твердая стенка и, следовательно, могут быть объединены в систему:

$$\begin{cases} q_{1\text{ср}} = \frac{\lambda_{1\text{ср}}}{\delta_{1\text{ср}}} \cdot (T_1 - T_2); \\ q_{2\text{ср}} = q_{2\text{ср}}^{\text{Т}} + q_{2\text{ср}}^{\text{изл}} = \frac{\lambda_{2\text{ср}}}{\delta_{2\text{ср}}} \cdot (T_2 - T_3) + C_{\text{пр,ср}} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right); \\ q_{3\text{ср}} = \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (T_3 - T_4). \end{cases} \quad (23)$$

Приведенный анализ процессов переноса теплоты позволяет выявить основные факторы, влияющие на величину потерь теплоты через твердогазовую футеровку. К таким факторам относятся толщина кладки, теплофизические характеристики материала кладки, разность температур поверхностей кладки, соотношение толщин различных слоев кладки, форма и размеры газовых объемов, оптические и радиационные характеристики поверхностей газового объема. Данные выводы справедливы при отсутствии конвективного переноса теплоты в газовой полости.

Твердо-газовая футеровка из современных огнеупорных и теплоизоляционных материалов

обладает технологичностью изготовления, поэтому все последующие расчеты проводили для многослойной твердо-газовой футеровки.

Допущения, принятые для расчета:

- режим работы печи — установившийся;
- в газовой прослойке отсутствует конвективный механизм передачи теплоты;
- поверхности F_2 и F_3 имеют форму двух бесконечных пластин;
- собственным излучением и поглощательной способностью газов можно пренебречь, так как толщина газовых прослоек небольшая.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ ТВЕРДО-ГАЗОВУЮ ФУТЕРОВКУ

В качестве примера для расчета потерь теплоты через футеровку выбрана система, состоящая из теплоизоляционных волокнистых материалов и газовых прослоек. Схематическое изображение футеровок, состоящих из пяти и трех слоев, представлено на рис. 2, а, б соответственно.

Перенос теплоты в твердых слоях происходит за счет молекулярного механизма теплопроводности, в то время как в газовом слое — за счет молекулярного переноса и переноса излучением через газовую прослойку.

Для первого слоя характерны величины: T_1 и T_2 — температуры поверхности со стороны рабочего пространства печи и на границе первого и второго слоев; λ_1 — средняя теплопроводность первого слоя; δ_1 — толщина первого слоя; q_1 — удельный поток теплоты через первый слой.

Для второго слоя характерны величины: T_2 и T_3 — температуры поверхности на границе первого и второго слоев и на границе второго и третьего слоев (она же температура поверхности третьего слоя); λ_2 — средняя теплопроводность слоя; δ_2 — толщина слоя; $C_{\text{пр}2}$ — приведенный коэффициент излучения в системе поверхность F_2 – F_3 ; ε_2 и ε_3 — степень черноты второй и третьей поверхности; q_2 — удельный поток теплоты через слой.

Для третьего слоя характерны величины: T_3 и T_4 — температуры поверхности на границе второго и третьего слоев и на границе третьего и четвертого слоев; λ_3 — средняя теплопроводность слоя; δ_3 — толщина слоя; q_3 — удельный поток теплоты через слой.

Для четвертого слоя характерны величины: T_4 и T_5 — температуры поверхности на границе третьего и четвертого слоев и на границе четвертого и пятого слоев; λ_4 — средняя теплопроводность слоя; δ_4 — толщина слоя; $C_{\text{пр}4}$ — приведенный коэффициент излучения в системе поверхностей F_4 – F_5 ; ε_4 и ε_5 — степень черноты четвертой и пятой поверхностей; q_4 — удельный поток теплоты через слой.

Для пятого слоя характерны величины: T_5 и T_6 — температуры поверхности на границе четверто-

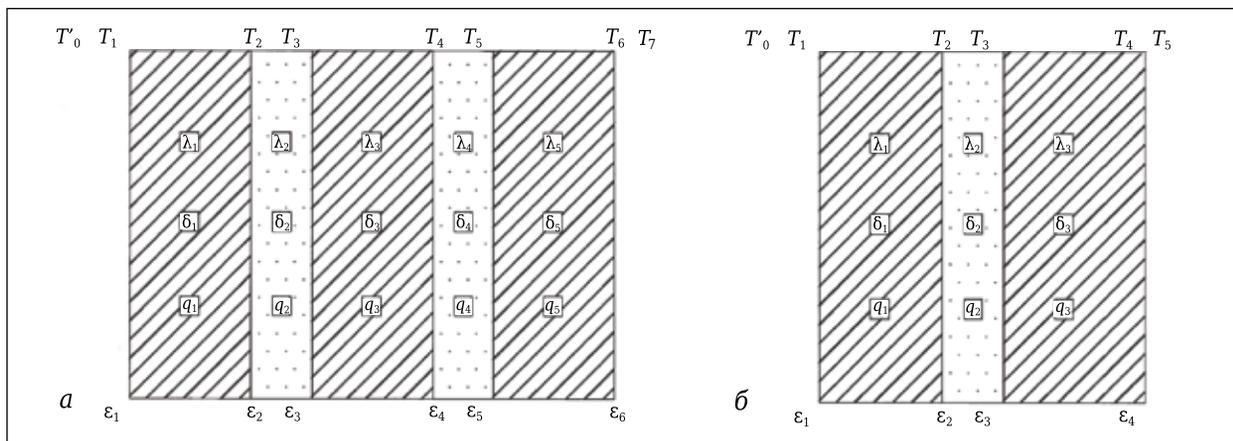


Рис. 2. Футеровки, состоящие из пяти (а) и трех (б) слоев

го и пятого слоев и со стороны окружающей среды; λ_5 — средняя теплопроводность слоя; δ_5 — толщина слоя; q_5 — удельный поток теплоты через слой.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ПЯТИСЛОЙНОЙ ФУТЕРОВКИ

Теплообмен в данной схеме футеровки характеризуется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}}; \\ q_2 = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} + C_{np2} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right); \\ q_3 = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}}; \\ q_4 = \frac{T_4 - T_5}{\frac{\delta_4}{\lambda_4}} + C_{np4} \cdot \left(\left(\frac{T_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_5}{100} \right)^4 \right); \\ q_5 = \frac{T_5 - T_6}{\frac{\delta_5}{\lambda_5}}; \\ q_6 = \alpha \cdot (T_6 - T_0), \end{cases} \quad (24)$$

где q_6 — удельный поток теплоты, характеризующий теплоотдачу от поверхности в окружающую среду.

В работе принято допущение о том, что режим установившийся, поэтому

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q_6 = q, \quad (25)$$

где q — удельный поток теплоты через футеровку.

Расчет проводим при граничных условиях третьего рода, т. е. известны температуры окружающей сред и условия теплообмена между ними. Удельный поток теплоты через кладку при граничных условиях третьего рода [3] равен:

$$q = \frac{T'_0 - T_0}{\frac{1}{\alpha'} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha}}. \quad (26)$$

При расчете принимаем, что интенсивность теплообмена на внутренней поверхности футеров-

ки в рабочем пространстве велика, поэтому считаем, что коэффициент теплоотдачи α' стремится к бесконечности [4]. Коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности футеровки можно принять равным для случая естественной конвекции.

Для системы с двумя плоскими бесконечными поверхностями $\varphi_{12} = \varphi_{21} = 1$. Отсюда следует, что приведенный коэффициент излучения зависит только от степени черноты поверхностей.

Для системы поверхностей F_2 и F_3

$$C_{np2} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}. \quad (27)$$

Для системы поверхностей F_4 и F_5

$$C_{np4} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_4} + \frac{1}{\varepsilon_5} - 1}. \quad (28)$$

Расчет производится с помощью численных методов [5]. Суть метода в последовательном приближении. Алгоритм решения заключается в следующем. Система разбивается на слои i . Когда i — нечетные, теплообмен происходит за счет теплопроводности; когда i — четные, теплообмен происходит за счет теплопроводности и излучения (шаг 1).

Для первого приближения предполагается, что температура по всей толщине футеровки меняется линейно. При известных толщинах каждого слоя находим температуры на гран ицах слоев (шаг 2). Рассчитываем тепловое сопротивление R_i для каждого слоя (шаг 3).

$$R_i = \begin{cases} \frac{\delta_i}{\lambda_i}, & \text{если } i \text{ четная;} \\ \frac{1}{\frac{\delta_i}{\lambda_i} + C_{np,i} \cdot \left(\frac{T_{i-1}}{100} - \frac{T_{i+1}}{100} \right) \cdot \left(\left(\frac{T_{i-1}}{100} \right)^2 - \left(\frac{T_{i+1}}{100} \right)^2 \right)}, & \text{если } i \text{ нечетная.} \end{cases}$$

С помощью суммарного по всем слоям теплового сопротивления рассчитываем плотность теплового потока через всю футеровку по формуле

$$q = \frac{T'_0 - T_0}{\sum R_i}. \quad (30)$$

Полученное значение запоминаем для дальнейшего сравнения (шаг 4).

С помощью рассчитанного на шаге 4 значения плотности потока теплоты находим распределение температур по толщине футеровки (шаг 5).

На следующем этапе по формуле (29) производим расчет новых тепловых сопротивлений по слоям с учетом температур, полученных на шаге 5 (шаг 6).

С помощью суммарного теплового сопротивления (состоящего из суммы тепловых сопротивлений для каждого слоя, полученных на шаге 6), вычисляем по формуле (30) значение плотности теплового потока (шаг 7).

После всех вышеперечисленных вычислений проводим сравнение значений q , полученных на шагах 5 и 7. Если модуль разности этих двух значений больше заданной погрешности 0,0001, то возвращаемся к шагу 3.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТРЕХСЛОЙНОЙ ФУТЕРОВКИ

Алгоритм расчета трехслойной футеровки аналогичен алгоритму расчета пятислойной. Теплообмен характеризуется следующей системой:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}}; \\ q_2 = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} + C_{\text{пр2}} \cdot \left(\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right); \\ q_3 = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}}; \\ q_4 = \alpha \cdot (T_4 - T_0), \end{cases} \quad (31)$$

где q_4 — удельный поток теплоты, характеризующий теплоотдачу от поверхности в окружающую среду.

Принимаем допущение, что режим установившийся:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q. \quad (32)$$

Температура рабочего пространства $T'_0 = 800$ °С, температура окружающей среды $T_0 = 25$ °С. В расчете системы использованы формулы (26)–(30).

Было произведено сравнение двух видов кладки: монолитной и твердо-газовой, состоящих из материала МКРГП-500. Причем твердо-газовая футеровка была получена из монолитной путем разделения ее на несколько твердых слоев. Слои раздвинуты на некоторое расстояние друг от друга. Получившаяся при этом прослойка заполнялась газом. Иными словами, толщина твердых слоев в двух системах была одинакова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана схема процессов теплообмена, протекающих в твердо-газовой футеровке, с учетом теплообмена излучением в газовом объеме. Показано, что при наличии в монолитной футеровке газовых объемов существенную роль приобретает теплообмен излучением пространства, заполненного газом.

С учетом технологичности изготовления многослойной кладки исследована схема твердо-газовой футеровки, представляющая собой систему из чередующихся твердых и газовых слоев. Выявлено, что основными факторами, влияющими на потери теплоты через твердо-газовую футеровку, являются теплофизические характеристики материала слоев, геометрические параметры слоев, оптические и радиационные характеристики поверхностей слоев. Собственное излучение газов в работе приравнялось к нулю вследствие малой толщины газовой прослойки.

Твердо-газовая футеровка может способствовать снижению потерь теплоты при определенных условиях. При расчете потерь теплоты монолитной и твердо-газовой футеровок было замечено, что потери теплоты в твердо-газовой футеровке значительно меньше, чем в монолитной. Потери теплоты можно также уменьшить, если снизить степень черноты излучающих поверхностей. Повышение степени черноты излучающей поверхности слоя приводит к увеличению потерь. Необходимо стремиться к снижению степени черноты на излучающих стенках.

На внешних границах газового слоя наблюдается скачок температур, чего нет в монолитной футеровке. Это обусловлено низкой теплопроводностью газового слоя и наличием теплообмена излучением в слое.

Температура рабочего пространства существенно влияет на теплообмен системы. Повышение температуры приводит к увеличению роли теплообмена излучением при переносе теплоты через твердо-газовую футеровку. При снижении температуры рабочего пространства скачок температур на внешних границах газового слоя увеличивается, так как роль теплообмена излучением снижается, а теплопроводность газового слоя — величина небольшая. И наоборот, при повышении температуры рабочего пространства скачок температур на внешних границах газового слоя уменьшается вследствие возрастания роли излучения.

Библиографический список

1. Информация // Теплопромпроект — промышленная огнеупорная теплоизоляция. — URL: <http://www.teplopromproekt.ru/about/> дата обращения 13.10.2013)
2. **Прибытков, И. А.** Теплообмен излучением: уч. пособие / И. А. Прибытков. — М.: МИСиС, 2008. — 98 с.
3. **Гусовский, В. Л.** Методики расчета нагревательных и термических печей / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. — М.: Теплотехник, 2004. — 400 с.
4. Теплотехника металлургического производства. В 2 т. / под ред. В. А. Кривандина. — М.: МИСиС, 2002. — 736 с.
5. **Арутюнов, В. А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. — М.: Металлургия, 1990. — 239 с. ■

Получено 07.07.16

© И. А. Прибытков, А. Ю. Терехова, 2016 г.