



УДК 669

Поступила 02.10.2015

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ФУТЕРОВКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПРИ РАБОТЕ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

ASSESSMENT OF THERMAL LOSSES OF ENWALL DESIGN DURING OPERATION OF CHAMBER FURNACE

С. М. КАБИШОВ, П. Э. РАТНИКОВ, И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, Управление науки и инновационного развития аппарата Совета министров Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

S. M. KABISHOV, P. E. RATNIKOV, I. A. TRUSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, D. V. MENDELEV, Department of science and innovation development of the office of council of Ministers, Minsk, Belarus

В статье представлена методика, позволяющая оценить энергоэффективность модернизации печи при замене футеровки, а также определить целесообразность использования многослойной конструкции в зависимости от рабочей температуры печи и условий теплообмена на поверхности. Разработана методика, позволяющая рассчитывать температуру поверхности футеровки при охлаждении в период выгрузки-загрузки деталей.

The paper presents a methodology that allows to estimate the energy efficiency of the furnace modernization by replacing the enwall, as well as to determine the feasibility of using a multi-layer structure depending on the operating temperature of the furnace and the heat transfer conditions at the surface. The methodology, which allows to calculate the temperature of the surface of the lining on cooling during the upload-download details.

Ключевые слова. *Камерная печь, модернизация, футеровка, тепловые потери, конвективный теплообмен, радиационный теплообмен, аккумуляция теплоты, методика.*

Keywords. *Chamber furnace, modernization, inwall, thermal losses, convective heat transfer, radiation heat transfer, accumulation of heat, methodology.*

Введение

Камерные электропечи широко применяются на предприятиях машиностроительной отрасли благодаря ряду достоинств [1, 2]. Вместе с тем, периодический режим работы, связанный с тем, что печь охлаждается в период выгрузки нагретой садки и загрузки новой, приводит к повышенным затратам энергии на последующий разогрев. В связи с этим значительную роль в вопросе повышения энергоэффективности термообработки в камерных печах играет конструкция футеровки.

Тепловые потери камерной электропечи при работе в установившемся режиме. Значительная часть камерных печей применяется для нагрева заготовок перед пластической деформацией, а также для окончательной термообработки деталей, что предполагает продолжительную работу печи с постоянной температурой (выдержка). Как следствие, тепловое состояние футеровки (ограждающих конструкций) в течение таких периодов можно считать квазистационарным.

Учитывая сказанное, для оценки влияния конструкции футеровки на величину тепловых потерь воспользуемся формулой, согласно которой температура на поверхности печи равна:

$$t_{\text{нар}} = \frac{t_{\text{печ}} + t_{\text{о.с.}} \alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{\alpha \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + 1}.$$

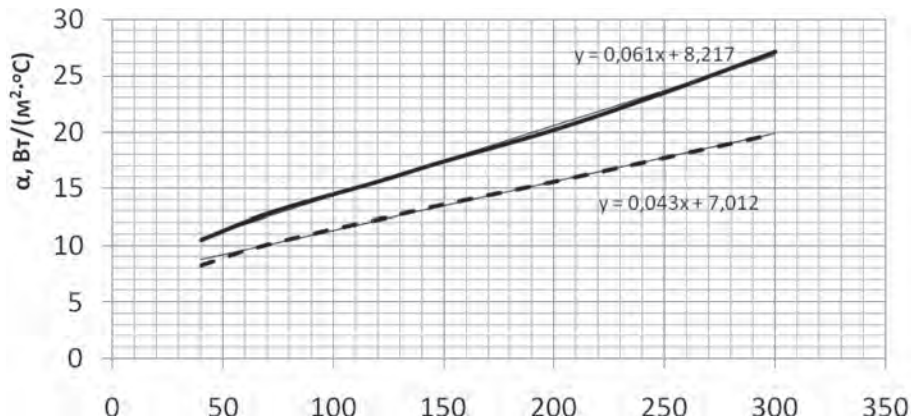


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от вертикальной плоской стенки при различной температуре поверхности и с учетом типа краски, которой покрыт кожух печи: — — обычная краска; ---- — алюминиевая краска; — — линейная (обычная краска); — — линейная (алюминиевая краска)

В работе [1] приведены значения коэффициента теплоотдачи от вертикальной плоской стенки при различной температуре поверхности и с учетом типа краски, которой покрыт кожух печи. Зависимости, построенные на основании этих данных, показаны на рис. 1. Представим уравнения линий тренда данных зависимостей в виде

$$\alpha = \alpha_0 + at.$$

Подставив данное выражение в формулу (1), получим квадратное уравнение

$$at_{\text{пов}}^2 + t_{\text{пов}} \left(\alpha_0 + 1 / \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} - at_{\text{o.c}} \right) - \left(t_{\text{печ}} / \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \alpha_0 t_{\text{o.c}} \right) = 0.$$

Решив его, получим зависимость температуры поверхности $t_{\text{пов}}$ от конструкции (толщины и количества слоев футеровки) и теплофизических свойств каждого из слоев (коэффициента теплопроводности). В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости температуры поверхности однослойной (толщиной $\delta = 400$ мм) и двухслойной футеровки (теплоизоляция $\delta_1 = 100$ мм, $\lambda_1 = 0,07$ Вт/(м²·°С), огнеупорный слой $\delta_2 = 300$ мм).

Как видно из рисунка, допустимая с точки зрения требований СанПИН температура поверхности 45 °С обеспечивается лишь при использовании огнеупорного материала с коэффициентом теплопроводности около 0,1 Вт/(м·°С). Таким требованиям удовлетворяют волокнистые огнеупоры, такие, как, на-

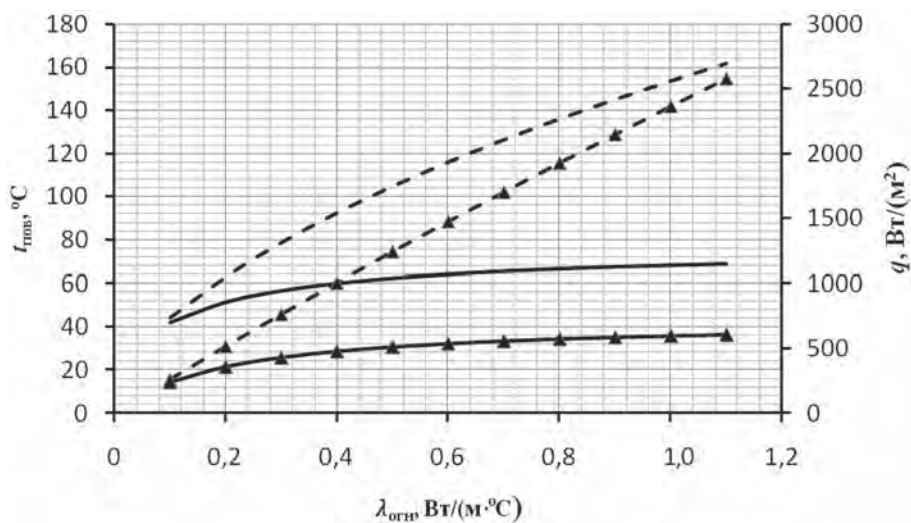


Рис. 2. Зависимость температуры наружной поверхности печи ($t_{\text{печ}} = 1100$ °С) с однослойной (толщиной $\delta = 350$ мм) и двухслойной футеровкой (теплоизоляция $\delta_1 = 50$ мм, $\lambda_1 = 0,07$ Вт/(м²·°С) огнеупорный слой $\delta_2 = 300$ мм) и соответствующей плотности теплового потока от коэффициента теплопроводности огнеупорного слоя: ---- $t_{\text{пов}}$ (однослойная футеровка); — — $t_{\text{пов}}$ (двухслойная футеровка); --▲-- q (однослойная футеровка); —▲— q (двухслойная футеровка)

пример, Kerablock Supermag (Keratech, Чехия) и др. При средней температуре слоя 550–600 °С толщиной 400 мм данный материал имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,07\text{--}0,075 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$. Применение двухслойной конструкции футеровки с теплоизоляцией толщиной 100 мм и $\lambda_1 = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$ позволяет получить аналогичный результат с более дешевым огнеупором, например, Kerablock HPS1260 либо его аналогом.

Следует отметить, что в местах, недоступных или труднодоступных для обслуживающего персонала, при двухслойной конструкции футеровки возможно применение более дешевых огнеупоров, так как это не приведет к значительному увеличению температуры поверхности. Так, применение, например, классических формованных шамотных огнеупоров ША-5 с $\lambda = 1,03 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ при средней температуре около 700 °С с теплоизоляцией (свойства см. выше) приведет к увеличению температуры на поверхности печи с 42 °С (при использовании волокнистых огнеупоров) до 68 °С. Но при этом тепловые потери возрастут в 2,5 раза. Поэтому с точки зрения энергоэффективности при квазистационарном режиме работы печи целесообразно всю футеровку изготавливать из материалов с малым коэффициентом теплопроводности (не более 0,15 Вт/(м·°С)).

Оценка тепловых потерь с наружной поверхности камерной печи в период выгрузки-загрузки садки. Режим работы камерной печи, как правило, периодический, т. е. циклы термообработки прерываются периодами загрузки-выгрузки садки. В течение данного периода футеровка печи охлаждается. В данной ситуации тепловой режим футеровки уже нельзя считать стационарным. Причем происходит охлаждение как внешней, так и внутренней поверхности. Оценка тепловых потерь за период загрузки-выгрузки требует решения нелинейной задачи теплопроводности при изменяющихся граничных условиях, а это, в свою очередь, привлечение численных методов расчета. В процессе балансовых исследований того или иного проектного решения выполнение данной работы не всегда возможно. В связи с этим более рациональным будет использование аналитической методики, позволяющей с приемлемой точностью рассчитывать тепловые потери ограждающих конструкций печи за время остановки.

В том случае, когда такие остановки кратковременны, при оценке тепловых потерь для упрощения задачи можно считать, что интенсивность теплообмена на поверхности ограждающих конструкций печи существенно не изменяется.

Далее произведем расчет температуры поверхности в процессе охлаждения при коэффициенте теплоотдачи $\alpha = \text{const}$. Для упрощения задачи будем считать, что футеровка состоит из теплоизоляционного и огнеупорного слоев. Толщина теплоизоляционного слоя δ_1 , а огнеупорного δ_2 .

Математическая формулировка задачи включает:

а) уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right); \quad (3)$$

б) граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta_i$, где δ_i – толщина слоя теплоизоляции либо огнеупорной футеровки при охлаждении внутренней поверхности печи):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{о.с.}}); \quad (4)$$

в) так как футеровка применяемых в промышленности печей обладает значительной тепловой инерционностью, будем считать, что на внутренней поверхности слоя (граница между огнеупором и теплоизоляцией) плотность теплового потока не изменяется, т. е. остается такой же, как и в стационарном состоянии:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta}; \quad (5)$$

г) начальное условие (при $\tau = \tau_0$):

$$T(x, \tau_0) = T_{\text{гр}} \Delta T_0 x / \delta, \quad (6)$$

где $\Delta T_0 = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр},0}$ в момент времени $\tau = \tau_0$, являющийся начальным для рассматриваемого процесса охлаждения ограждающих конструкций камерной печи.

В качестве допущения будем считать, что зависимость температуры в охлаждаемом слое от координаты и времени при $\tau > \tau_0$ будет иметь вид

$$T(x, \tau) = T(x, \tau_0) - (\Delta T_0 - \Delta T_\tau) x^k / \delta^k. \quad (7)$$

Исследуем режим остывания слоя футеровки, используя интегральное балансовое соотношение:

$$\frac{dQ(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T_0}{\partial x} \right)_{x=0} + \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T_i}{\partial x} \right)_{x=\delta} = \frac{\lambda}{\delta^2} \Delta T_0 + \frac{\lambda}{\delta} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\delta}, \quad (8)$$

где $Q(\tau) = \rho c (\bar{T} - T_{o.c.})$ – избыточное среднее теплосодержание 1 м³ слоя футеровки толщиной δ .

Соотношение (8) получается путем интегрирования обеих частей уравнения теплопроводности (3) при учете граничных условий (4), (5) и обозначении средней по сечению заготовки температуры:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta x T(x, \tau) dx. \quad (9)$$

Используя граничное условие (4), приведем интегральное соотношение (9) к виду

$$\delta \left(\frac{d(Q(\tau))}{d\tau} \right) = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - \alpha (T_{пов} - T_{o.c.}). \quad (10)$$

Далее найдем выражение средней по сечению слоя температуры с учетом соотношения (9) и распределения (7). Получим

$$\bar{T}(\tau) = T_{гр} + \frac{1}{2} \Delta T_0 - \frac{1}{k+1} \Delta T_0 + \frac{1}{k+1} \Delta T_\tau = \frac{k}{k+1} T_{гр} + \frac{1}{k+1} T_{пов} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0 \quad (11)$$

При заданном распределении температуры по сечению слоя футеровки определим $\partial T / \partial x$ при $x = \delta$:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = -\frac{1}{\delta} (-\Delta T_0 + k \Delta T_0 - k \Delta T_\tau) = \frac{k}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right). \quad (12)$$

Перепишем граничное условие (4) с учетом соотношения (12):

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = \alpha (T_{пов} - T_{o.c.}).$$

Заменив перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_\tau = T_{пов} - T_{гр}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{гр}$, получим

$$T_{гр} = \frac{Bi}{k} (T_{пов} - T_{o.c.}) + T_{пов} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \quad (13)$$

где принято $Bi = \alpha \delta / \lambda$.

Найдем приращение средней температуры $\bar{T}(\tau)$, используя выражение (12):

$$d\bar{T}(\tau) = \left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) dT_{пов, i}.$$

Соответственно приращение теплосодержания dQ равно:

$$d\bar{Q}(\tau) = \rho c d\bar{T} = \rho c \left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) dT_{пов, i}.$$

Подставив это соотношение в балансовое уравнение (10), получим

$$\left[\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) / Bi \right] \frac{dT_{пов}}{T_{пов} - T_{o.c.} + \frac{\Delta T_0}{Bi}} = -dFo, \quad (14)$$

где $Fo = \frac{\lambda \tau}{\rho c \delta^2}$.

Интегрируя уравнение (14) в пределах от $T_{пов,0}$ до $T_{пов,\tau}$ (в левой части) и от τ_0 до τ (в правой части), получаем решение задачи в виде:

$$Fo - Fo_0 = \left[\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right) / Bi \right] \ln \frac{T_{пов,0} - T_{о.с} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}{T_{пов,\tau} - T_{о.с} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}. \quad (15)$$

Так как целью расчетов на данном этапе является оценка влияния теплофизических характеристик материала на процесс остывания футеровки в процессе разгрузки-загрузки садки, выразим из (15) $T_{пов,\tau}$:

$$T_{пов,\tau} = \frac{T_{пов,0} - T_{о.с} + \frac{\Delta T_0}{Bi}}{\exp \left[\frac{(Fo - Fo_0)Bi}{\left(\frac{Bi}{k+1} + 1 \right)} \right]} + T_{о.с} - \frac{\Delta T_0}{Bi} \quad (16)$$

Показатель k может быть определен путем проведения экспериментальных исследований при охлаждении плоской стенки, изготовленной из различных материалов.

При постоянной интенсивности охлаждения и толщине слоя футеровки скорость охлаждения будут определять теплофизические характеристики материала. Из выражения (16) следует, что температура поверхности в процессе охлаждения обратно пропорциональна экспоненте в знаменателе первой дроби. Следовательно, при $Fo_0 = 0$ соотношение $a = \lambda/\rho c$, т. е. коэффициент теплопроводности будет определять скорость охлаждения поверхности стенки печи. При прочих равных условиях (толщина слоя, коэффициент теплоотдачи) медленнее будет охлаждаться материал с меньшим коэффициентом теплопроводности. Например, для шамота ША-5 $a = 6,455 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а для волокнистой футеровки (Kerablok HPS 1260) $a = 5,31 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Таким образом, несмотря на меньшую массивность, футеровка из волокнистых материалов при кратковременных остановках будет охлаждаться медленнее, чем классическая кладка из шамота ША-5.

Таким образом, выше изложена методика, позволяющая оценить изменение температуры наружных поверхностей футеровки печи и рассчитать величину тепловых потерь за период загрузки-выгрузки. Если печь во время остановки остается закрытой, то полученный результат есть не что иное, как теплота, которая аккумулируется кладкой в процессе последующего разогрева до рабочей температуры.

В том случае, когда температура поверхности футеровки изменяется в значительных пределах, т. е. при длительных остановках, коэффициент теплоотдачи уже нельзя считать константой. Рассмотрим вариант линейной зависимости α от температуры (рис. 1). Математическая формулировка задачи включает в себя:

- а) уравнение нестационарной теплопроводности (3);
- б) граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta_i$, где δ – толщина слоя теплоизоляции):

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \alpha (T_{пов} - T_{о.с.}) = (aT_{пов} + \alpha_0)(T_{пов} - T_{о.с.}). \quad (17)$$

Здесь зависимость $\alpha = f(T_{пов})$ задается на основании данных, приведенных в работе [1]. Так, для стенки, покрытой обыкновенной краской, зависимость в диапазоне температур от 40 до 300 °С будет иметь вид

$$\alpha = 0,0618T_{пов} + 8,22.$$

При использовании алюминиевой краски

$$\alpha = 0,043T_{пов} + 7,01.$$

Вновь воспользуемся допущениями (5) и (7) и начальным условием (6).

Как и в предыдущем случае, исследуем режим остывания слоя футеровки, используя интегральное балансовое соотношение (8).

Перепишем граничное условие (17) с учетом соотношения (12) и зависимости коэффициента теплообмена на поверхности печи от температуры поверхности:

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right).$$

Заменяя перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_\tau = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр}}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{\text{гр}}$, получим:

$$T_{\text{гр}} = \frac{a\delta}{k\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \bar{T}(\tau) &= \frac{k}{k+1} \left[\frac{a\delta}{k\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right] + \frac{1}{k+1} T_{\text{пов}} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0 = \\ &= \frac{1}{k+1} \frac{a\delta}{\lambda} \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + T_{\text{пов}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Следовательно, приращение средней по сечению слоя температуры будет равно:

$$d\bar{T}(\tau) = \frac{1}{k+1} \frac{a\delta}{\lambda} d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + dT_{\text{пов}}.$$

Подставив данное выражение в балансовое уравнение, получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{k+1} \frac{a\rho c\delta^2}{\lambda} \left(d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + \frac{(k+1)\lambda}{a\delta} dT_{\text{пов}} \right) = \\ = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) d\tau. \end{aligned} \quad (19)$$

Учитывая, что $Fo = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\tau}{\delta^2}$, получаем

$$\begin{aligned} \frac{a}{k+1} \left[d \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) + \frac{(k+1)\lambda}{a\delta} dT_{\text{пов}} \right] = \\ = \left[-\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) \right] dFo. \end{aligned} \quad (20)$$

Перенесем множитель перед dFo и отдельно проинтегрируем полученное выражение в пределах от $T_{\text{пов},0}$ до $T_{\text{пов},\tau}$ (в левой части) и от τ_0 до τ (в правой части). При интегрировании по $dT_{\text{пов}}$ представим знаменатель в виде:

$$\begin{aligned} 1 / \left[-\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - a \left(T_{\text{пов}}^2 + T_{\text{пов}} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} \right) \right] = \\ = \left[\frac{1}{T_{\text{пов}} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} - \frac{1}{T_{\text{пов}} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} \right] \cdot \frac{1}{T_{\text{o.c}} - \frac{\alpha_0}{a}}. \end{aligned}$$

После интегрирования получим

$$\begin{aligned} Fo - Fo_0 &= \frac{1}{k+1} \ln \frac{T_{\text{пов},0}^2 + T_{\text{пов},0} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} + \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}{T_{\text{пов},\tau}^2 + T_{\text{пов},\tau} \left(\frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} \right) - \frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} + \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0} + \\ &+ \frac{1}{T_{\text{o.c}} - \frac{\alpha_0}{a}} \frac{\lambda}{a\delta} \left[\ln \frac{T_{\text{пов},0} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}}{T_{\text{пов},\tau} + \frac{\alpha_0}{a} - T_{\text{o.c}} + \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} - \ln \frac{T_{\text{пов},0} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}}{T_{\text{пов},\tau} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{o.c}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}} \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

Решение справедливо при условии:

$$T_{\text{пов}} \neq -\frac{\alpha_0}{a} + T_{\text{о.с.}} - \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{о.с.}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0},$$

$$T_{\text{пов}} \neq \sqrt{\frac{\alpha_0}{a} T_{\text{о.с.}} - \frac{\lambda}{a\delta} \Delta T_0}.$$

Оценка тепловых потерь с внутренней поверхности камерной печи в период выгрузки-загрузки садки. При высокой температуре охлаждаемой поверхности определяющую роль играет лучистый теплообмен. В связи с этим математическую формулировку задачи охлаждения плоской стенки представим в следующем виде:

а) уравнение нестационарной теплопроводности (3);

б) граничное условие на охлаждаемой поверхности (при $x = \delta$, где δ – толщина слоя теплоизоляции либо огнеупорной футеровки при охлаждении внутренней поверхности печи):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \sigma_0 \varepsilon \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4) = \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (22)$$

Вновь рассмотрим интегральное балансовое соотношение (8) с допущениями (5) и (7) и начальным условием (6).

С учетом граничных условий (22) и (5) приведем интегральное соотношение (8) к виду:

$$\delta \left(\frac{d(Q(\tau))}{d\tau} \right) = -\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta} - \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (23)$$

Далее найдем выражение средней по сечению слоя температуры с учетом соотношения (23) и распределения (7). Получим

$$\bar{T}(\tau) = T_{\text{гр}} + \frac{1}{2} \Delta T_0 - \frac{1}{k+1} \Delta T_0 + \frac{1}{k+1} \Delta T_\tau = \frac{k}{k+1} T_{\text{гр}} + \frac{1}{k+1} T_{\text{пов}} + \frac{k-1}{k+1} \Delta T_0. \quad (24)$$

При заданном распределении температуры по сечению слоя футеровки определим $\partial T / \partial x$ при $x = \delta$:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -\frac{1}{\delta} (-\Delta T_0 + k \Delta T_0 - k \Delta T_\tau) = \frac{k}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right). \quad (25)$$

Перепишем граничное условие (22) с учетом соотношения (25):

$$-\frac{k\lambda}{\delta} \left(\Delta T_\tau - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 \right) = \sigma \cdot 10^{-8} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4).$$

Заменив перепад температур по сечению слоя на выражение $\Delta T_\tau = T_{\text{пов}} - T_{\text{гр}}$ и выразив значение температуры на границе слоев $T_{\text{гр}}$, получим:

$$T_{\text{гр}} = T_{\text{пов}} - \frac{k-1}{k} \Delta T_0 + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{k\lambda} (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4). \quad (26)$$

Запишем приращение средней температуры $\bar{T}(\tau)$, используя выражение (25):

$$d\bar{T}(\tau) = dT_{\text{пов}} + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{(k+1) \cdot \lambda} d(T_{\text{пов}}^4).$$

Соответственно приращение теплосодержания dQ равно:

$$d\bar{Q}(\tau) = \rho c d\bar{T} = \rho c \left(dT_{\text{пов}} + \frac{\delta \sigma \cdot 10^{-8}}{(k+1) \cdot \lambda} d(T_{\text{пов}}^4) \right).$$

Разделив переменные, получим

$$\frac{\lambda}{\delta \sigma \cdot 10^{-8}} dT_{\text{пов}} + \frac{1}{k+1} dT_{\text{пов}}^4}{T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4 + \frac{\lambda}{\sigma \cdot 10^{-8}} \Delta T_0} = -dFo. \quad (27)$$

Обозначим $B^4 = \frac{\lambda}{\delta \sigma \cdot 10^{-8}} \Delta T_0 - T_{o.c}^4$.

Интегрируя уравнение (27) в пределах от $T_{пов,0}$ до $T_{пов,\tau}$ (в левой части) и от F_{o0} до F_o (в правой части), получаем решение задачи в виде

$$F_o - F_{o0} = \frac{\lambda}{\sigma \cdot 10^{-8} \delta} \left[\ln \frac{(T_{пов,0}^2 + BT_{пов,0} \sqrt{2 + B^2})(T_{пов,\tau}^2 - BT_{пов,\tau} \sqrt{2 + B^2})}{(T_{пов,0}^2 - BT_{пов,0} \sqrt{2 + B^2})(T_{пов,\tau}^2 + BT_{пов,\tau} \sqrt{2 + B^2})} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2\sqrt{2}B^3} \left(\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}BT_{пов,0}}{B^2 - T_{пов,0}^2} - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}BT_{пов,\tau}}{B^2 - T_{пов,\tau}^2} \right) \right] + \\ + \frac{1}{k+1} \ln \frac{T_{пов,0}^4 - B^4}{T_{пов,\tau}^4 - B^4}. \quad (28)$$

Решая графическим способом данное уравнение, можно определить, какова будет температура поверхности печи в конце периода охлаждения. В случае, когда рассматривается процесс охлаждения внутренней поверхности печи, коэффициент σ следует умножить на соответствующий коэффициент диффрагмирования и отношение площади открытого окна к площади охлаждаемой поверхности. Степень температурной функции k может быть определена на основании экспериментальных исследований.

Выводы

Представлена методика, позволяющая на предпроектной стадии выполнять оценку эффективности модернизации печи путем замены футеровки, а также определять целесообразность использования конкретных материалов либо многослойной конструкции в зависимости от рабочей температуры печи и условий теплообмена на поверхности. Разработана методика, позволяющая рассчитывать температуру поверхности футеровки при охлаждении в период выгрузки-загрузки садки.

Литература

1. А р е н д а р ч у к, А. В. Общепромышленные электропечи периодического действия / А. В. Арндарчук, А. С. Бородачев, В. И. Филиппов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 112 с.
2. А в е р и н, С. И. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов [и др.]. Харьков: Техника, 1969. 540 с.

References

1. A r e n d a r c h u k, A. V., B a r a d a c h e v A. S., F i l i p p o v V. I. *Obshhepromyshlennye elektropechi periodicheskogo dejstvija* [Common industrial electric batch]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 112 p.
2. A v e r i n, S. I., G o l d f a r b E. M., K r a v t s o v A. F. [et al.] *Raschety nagrevatel'nyh pechej* [Calculations of heating furnaces]. Kharkiv, Engineering Publ., 1969. 540 p.

Сведения об авторе

Кабишов Сергей Михайлович, Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь. E-mail: boxsmk@gmail.com. Тел. моб.: +375 29 768 17 78.

Information about the authors

Kabishov Sergey, Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti ave., Minsk, 200013, Belarus. E-mail: boxsmk@gmail.com. Tel.: +375 29 768 17 78.