



*The furnace temperature and temperature field definition procedure during heating of rectangular blanks is worked out, based on the heat balance for heating furnaces of continuous operation.*

В. В. ФИЛИППОВ, В. А. ТИЩЕНКО, РУП "БМЗ"  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ,  
С. М. КОЗЛОВ, И. Г. БИОХ, БГПА

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА ДЛЯ ПЕЧЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

УДК 669.041

В настоящей работе изложена методика, позволяющая получить уравнение для вычисления температуры печи на основе теплового баланса [1] по мгновенному расходу топлива в процессе нагрева. Приведенная методика учитывает не начальную и конечную температуры термомассивного металла при нагреве его в проходных печах непрерывного действия, как, например, в работах [1, 2] и др., а распределение температуры по сечению слитков и заготовок в текущий момент времени, что существенно повышает точность расчетов.

Рассмотрим данную задачу на примере нагрева призмы прямоугольного сечения при теплообмене на поверхности путем излучения и конвекции. Согласно допущениям [3–5], процесс нагрева металла описывается системой уравнений:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

$$0 < x < R_1, \quad 0 < y < R_2, \quad 0 < t < t_k$$

с начальным

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R_1, y, t)}{\partial x} = \alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R_1, y, t)), \quad (3)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x, R_2, t)}{\partial y} = \alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(x, R_2, t)),$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0,$$

где  $t$  — текущее время, ч;  $t_k$  — время окончания процесса нагрева, ч;  $R_1, R_2$  — половина длины и ширины узкой грани призмы, м;  $x, y$  — текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от центра, м;  $T_{\text{печ}}(t)$  — температура печи в момент времени  $t$ , К;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\sigma$  — коэффициент теплообмена радиацией, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\lambda(T)$  — теплопроводность металла, Дж/(м·ч·К);  $c(T)$  — теплоемкость металла, Дж/(кг·К);  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $T_0$  — начальное равномерное распределение температуры в призме, К;  $T(x, y, t)$  — температура в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ , К.

Положим, что вдоль оси  $Z$  (по длине призмы) изменение температуры незначительно и им можно пренебречь.

Известен мгновенный расход топлива в течение всего периода нагрева  $0 < t < t_k$ .

Средняя по объему температура металла определяется по формуле

$$T_{\text{ср}}(t) = \frac{1}{\text{mes}V} \int \int V T(x, y, t) dx dy, \quad (4)$$

где  $\text{mes}V$  — площадь сечения призмы, м<sup>2</sup>.

Зафиксируем момент времени  $t$  и  $\Delta t$ . Рассмотрим различные статьи расхода теплоты, необходимые для составления уравнения теплового баланса [1].

1. Расход теплоты на нагрев металла с  $T_{cp}(t)$  до  $T_{cp}(t+\Delta t)$  (полезная теплота):

$$Q_{пол}(t) = \frac{P}{3600} c_m (T_{cp}(t+\Delta t) - T_{cp}(t)), \quad (5)$$

где  $P$  — производительность печи, кг/ч;  $c_m$  — средняя удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К);  $T_{cp}(t)$  — средняя по объему температура в момент времени  $t$ , К;  $T_{cp}(t+\Delta t)$  — средняя по объему температура в момент времени  $\Delta t$ , К.

2. Расход теплоты с дымовыми газами, покидающими печь (для топливных печей):

$$Q_{yx}(t) = B(t) V_d c_d T_{yx} \Delta t, \quad (6)$$

где  $B(t)$  — расход топлива, кг/с, м<sup>3</sup>/с;  $V_d$  — объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_d$  — удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_{yx}$  — температура уходящих дымовых газов (принимается в соответствии с температурным режимом печи), К.

3. Расход теплоты вследствие потерь через футеровку (кладку) печи:

$$Q_{кл}(t) = \frac{T_{печ}(t)}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} F_{ст} \Delta t, \quad (7)$$

где  $S_1/\lambda_1$ ,  $S_2/\lambda_2$  — тепловые сопротивления (отношения толщины слоев футеровки к их коэффициентам теплопроводности), (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $\alpha_c$  — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стен печи окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{ст}$  — площадь наружной поверхности футеровки печи, м<sup>2</sup>;  $T_{окр}$  — температура окружающего воздуха, К.

4. Расход теплоты излучением через открытые окна и дверцы печи:

$$Q_{отв}(t) = C_0 (T_{печ}(t)/100)^4 \phi \psi F \Delta t, \quad (8)$$

где  $C_0 = 5,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\phi$  — коэффициент диафрагмирования (определяется по графику [1], стр. 49);  $\psi$  — относительное время открытия окна или дверцы (если окно открыто 30 мин в течение 1 ч, то  $\psi = 0,5$ );  $F$  — площадь окна или дверцы, м<sup>2</sup>.

5. Расход теплоты на нагрев транспортирующих устройств (поддонов, конвейеров):

$$Q_{тр}(t) = M_{тр} c_{тр} (T_{тр}(t+\Delta t) - T_{тр}(t)),$$

где  $M_{тр}$  — масса транспортирующих устройств, находящихся в печи в течение времени  $\Delta t$ , кг;  $c_{тр}$  — средняя удельная теплоемкость транспортирующих устройств, находящихся в печи в течение времени  $\Delta t$ , Дж/(кг·К);  $T_{тр}(t)$  — температура транспортирующих устройств в момент времени  $t$ , К;  $T_{тр}(t+\Delta t)$  — температура транспортирующих устройств в момент времени  $(t+\Delta t)$ , К.

Предположим также, что изменение температуры нагрева транспортирующих устройств соответствует изменению температуры печи:

$$Q_{тр}(t) = M_{тр} c_{тр} (T_{печ}(t+\Delta t) - T_{печ}(t)). \quad (9)$$

6. Расход теплоты вследствие потерь через металлические стержни и вставки в футеровке печи (анкеры для крепления футеровки из керамического волокна и т.п.), называемые тепловыми короткими замыканиями:

$$Q_{т.к.з}(t) \approx Q_{кл}(t). \quad (10)$$

7. Неучтенные потери:

$$Q_{неучт}(t) = 0,1(Q_{кл}(t) + Q_{отв}(t) + Q_{тр}(t) + Q_{т.к.з}(t)) \quad (11)$$

Таким образом, суммарный расход теплоты в топливной печи непрерывного действия в момент  $t$  определяется так:

$$\sum Q_{расх}(t) = Q_{пол}(t) + Q_{yx}(t) + Q_{кл}(t) + Q_{отв}(t) + Q_{тр}(t) + Q_{т.к.з}(t) + Q_{неучт}(t). \quad (12)$$

Перечислим статьи прихода теплоты.

1. Приход теплоты от сжигания топлива (теплота химических реакций горения):

$$Q_{х.т}(t) = B(t) Q_H^p \Delta t, \quad (13)$$

где  $Q_H^p$  — низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг, Дж/м<sup>3</sup>.

2. Приход теплоты при подогреве воздуха, подаваемого для сжигания топлива (физическая теплота воздуха):

$$Q_{ф.в}(t) = B(t) V_B c_B T_B \Delta t, \quad (14)$$

где  $V_B$  — объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг или 1 м<sup>3</sup> топлива (с учетом требуемого избытка воздуха), м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_B$  — средняя удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $T_B$  — температура подогрева воздуха, К.

3. Приход теплоты при подогреве топлива (физическая теплота топлива):

$$Q_T(t) = B(t)c_T T_T \Delta t, \quad (15)$$

где  $c_T$  — средняя удельная теплоемкость топлива, Дж/(кг · К), Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $T_T$  — температура подогрева топлива, К.

Итак, суммарный приход теплоты в топливной печи непрерывного действия в момент времени  $t$  определяется так:

$$\sum Q_{\text{прих}}(t) = Q_{\text{х.т.}}(t) + Q_{\text{ф.в.}}(t) + Q_{\text{ф.т.}}(t) \quad (16)$$

В соответствии с законом сохранения энергии суммарный расход теплоты должен компенсироваться суммарным приходом ее в печь. Поэтому уравнение теплового баланса имеет вид

$$\sum Q_{\text{расх}}(t) = \sum Q_{\text{прих}}(t) \quad (17)$$

Подставляя (12), (16) в (17) и учитывая уравнения (5)–(11), (13)–(15), получаем

$$\begin{aligned} \frac{P}{3600} c_m (T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t)) + B(t) V_d c_d T_{\text{yx}} \Delta t + 2,2 \frac{T_{\text{печ}}(t)}{S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_c} F_{\text{ст}} \Delta t + \\ 1,1 c_0 (T_{\text{печ}}(t)/100)^4 \phi \psi F \Delta t + 1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{ср}} (T_{\text{печ}}(t + \Delta t) - T_{\text{печ}}(t)) = B(t) Q_{\text{H}}^p \Delta t + \\ B(t) V_B c_B T_B \Delta t + B(t) c_T T_T \Delta t. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (4) следует, что

$$T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t) = \frac{4}{\text{mes}V} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} (T(x, y, t + \Delta t) - T(x, y, t)) dx dy. \quad (19)$$

Учитывая (1), (3), получаем

$$\begin{aligned} \rho c(T) \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, \theta) dx dy = \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, \theta) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}(x, y, \theta) \right] \right) dx dy = \\ \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, \theta) \right] dx dy + \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}(x, y, \theta) \right] dx dy = \int_0^{R_2} \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial x}(x, y, \theta) \Big|_0^{R_1} dy + \\ \int_0^{R_1} \lambda(t) \frac{\partial T}{\partial y}(x, y, \theta) \Big|_0^{R_2} dx = \int_0^{R_2} \left[ \alpha(T_{\text{печ}}(\theta) - T(R_1, y, \theta)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(\theta) - T^4(R_1, y, \theta)) \right] dy + \\ \int_0^{R_1} \left[ \alpha(T_{\text{печ}}(\theta) - T(x, R_2, \theta)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(\theta) - T^4(x, R_2, \theta)) \right] dx. \end{aligned} \quad (20)$$

Подставляя (20) в (19), имеем

$$\begin{aligned} T_{\text{ср}}(t + \Delta t) - T_{\text{ср}}(t) = \frac{4\Delta t}{\rho c(T) \text{mes}V} \int_0^{R_2} \left[ \alpha(T_{\text{печ}}(\theta) - T(R_1, y, \theta)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(\theta) - T^4(R_1, y, \theta)) \right] dy + \\ \int_0^{R_1} \left[ \alpha(T_{\text{печ}}(\theta) - T(x, R_2, \theta)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(\theta) - T^4(x, R_2, \theta)) \right] dx. \end{aligned} \quad (21)$$

Подставим (21) в (18), приведем подобные слагаемые, разделим на  $\Delta t$  и перейдем к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Учитывая, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T_{\text{печ}}(t + \Delta t) - T_{\text{печ}}(t)}{\Delta t} = \frac{dT_{\text{печ}}(t)}{dt}$$

и

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ t \leq \theta \leq t + \Delta t}} T(x, y, \theta) = T(x, y, t)$$

в конечном итоге получаем

$$\frac{dT_{\text{печ}}(t)}{dt} = A_1 B(t) - A_2 T_{\text{печ}}(t) - A_3 T_{\text{печ}}^4(t) - A_4 \left( \int_0^{R_2} [\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R_1, y, t)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R_1, y, t))] dy + \int_0^{R_1} [\alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(x, R_2, t)) + \beta(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(x, R_2, t))] dx \right)$$

где

$$A_1 = \frac{Q_H^p + V_B c_B T_B + c_T T_T - V_D c_D T_{\text{ух}}}{1,1 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}}};$$

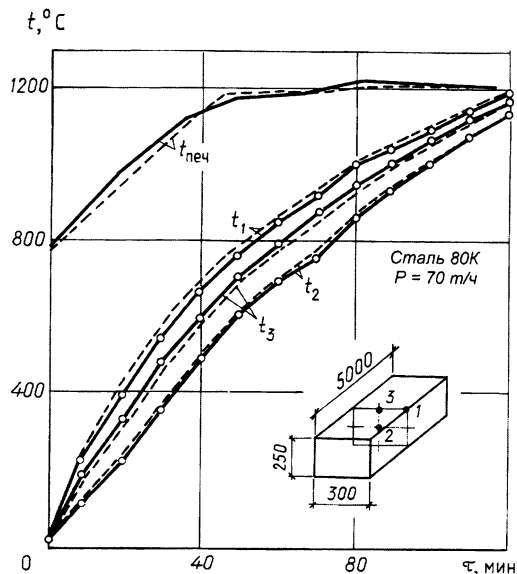
$$A_2 = \frac{2 F_{\text{ст}}}{M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} (S_1 / \lambda_1 + S_2 / \lambda_2 + 1 / \alpha_c)};$$

$$A_3 = \frac{c_0 \phi \Psi F}{10^8 M_{\text{тр}} c_{\text{тр}}};$$

$$A_4 = \frac{P c_m}{990 \rho c(T) M_{\text{тр}} c_{\text{тр}} \text{mes} V}.$$

Предлагаемая методика определения температуры печи была апробирована по данным промышленного эксперимента, проведенного в условиях нагревательной печи стана 850 Белорусского металлургического завода. Исходные данные для расчета: производительность печи — 70 т/ч; сталь — 80 К; размер заготовок — 0,250×0,300 м; топливо — природный газ; расход топлива (по данным промышленного эксперимента) — 2765 м<sup>3</sup>/ч. Результаты изменения температуры печи и температур в характерных точках сечения заготовок приведены на рисунке. Здесь очевидно удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных изменения температур, при этом наблюдается удовлетворительное согласование величин суммарного расхода топлива на печь (по данным промышленного эксперимента  $B_x = 2765$  м<sup>3</sup>/ч, по результатам расчета  $B_x = 2780$  м<sup>3</sup>/ч).

Таким образом, изложенная методика может быть использована для разработки рациональных температурно-тепловых режимов нагрева металла в проходных печах и анализа параметров тепловой работы печи.



Изменение температуры печи и температур в характерных точках сечения заготовки размером 0,250×0,300 м (сталь 80К)

### Литература

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Учеб. пособие: Под общ. ред. В. И. Тимошпольского. Мн.: Выш. шк., 1992.
2. Аверин С. И. и др. Расчеты нагревательных печей / Под ред. Н. Ю. Тайца. Киев: Техника, 1969.
3. Тимошпольский В. И., Стеблов А. Б., Ковалевский В. Б. и др. Теплотехнология металлургических мини-заводов. Мн.: Навука і тэхніка, 1992.
4. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
5. Филиппов В. В., Тимошпольский В. И., Тищенко В. А. и др. Разработка рациональной теплотехнологии нагрева кордовой стали в проходной печи стана 850 РУП "БМЗ" // Изв. вузов и энергетич. объедин. СНГ. Энергетика. 2000. № 2.