



The results of parametric identification of the mathematical model of fine elements heating by radiation in pusher furnaces of modern construction are given.

В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Г. РОМАДАН, В. В. СУХАН,  
Белорусский национальный технический университет

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПРИ ТЕПЛОБМЕНЕ РАДИАЦИЕЙ

УДК 669.041

Сложность теплообменных процессов в высокотемпературных нагревательных и термических печах, недостаточность априорной информации о процессах нагрева металла в печах приводят к необходимости создания математических моделей для последующей оптимизации этих процессов по тому или иному критерию качества. Современная методология исследования теплофизических и теплотехнологических явлений изучаемых процессов базируется на сочетании методов математического моделирования, проведении промышленных и вычислительных экспериментов (например, [1, 2]). В процессе исследования важнейшей является задача идентификации создаваемых моделей по результатам промышленных экспериментов.

Запишем модель процесса нагрева термически тонких тел в виде (на основе уравнения теплового баланса):

$$\frac{dT_{\text{пч}}}{dt} = A_1 B(t) + A_2 T^4(t) + A_3 T_{\text{пч}}^4(t), \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4),$$

$$T_{\text{пч}}(0) = T_{r_0}, \quad T(0) = T_0, \quad T(t_k) = T_k, \quad (2)$$

где  $T_{\text{пч}}(t)$ ,  $T(t)$  — соответственно температура греющей среды и нагреваемого металла в момент времени  $t$ ;  $B(t)$  — расход газа в момент времени  $t$ ;  $t_k$  — время окончания процесса нагрева;  $T_{r_0}$ ,  $T_0$ ,  $T_k$  — соответственно начальная температура греющей среды, нагреваемого металла и конечная температура металла;  $\sigma$ ,  $A_1$  —  $A_3$  — константы, характеризующие динамику процесса нагрева.

Величины  $A_1$  —  $A_3$  определяются следующим образом:

$$A_1 = \frac{(Q_{\text{H}}^{\text{p}} + V_{\text{B}} C_{\text{B}} T_{\text{B}} + C_{\text{T}} T_{\text{T}} - V_{\text{д}} C_{\text{д}} T_{\text{yx}}) \tau}{l, l_{\text{м.тр}} C_{\text{тр}}},$$

$$A_2 = \frac{p C_{\text{м}} \sigma \tau}{V \cdot l, l_{\text{м.тр}} C_{\text{тр}}},$$

$$A_3 = \frac{-p C_{\text{м}} \sigma \tau}{V \cdot l, l_{\text{м.тр}} C_{\text{тр}}} - \frac{2,2 F_{\text{ст}} \tau}{(S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + l/\alpha_c) l, l_{\text{м.тр}} C_{\text{тр}}}.$$

Физический смысл всех величин можно найти в [3]. Попытка определить коэффициенты  $\sigma$ ,  $A_1$  —  $A_3$  наталкивается на следующие трудности: во-первых, печь представляет собой нагревательное устройство с присущими только ей конструктивными особенностями (например, расположение транспортных устройств, шагающих балок и шагающего пода и др.); во-вторых, неизвестны тепловые сопротивления; в-третьих, изменяются по времени удельные теплоемкости металла и продуктов сгорания.

Все это приводит к тому, что теоретически рассчитанные коэффициенты могут внести в модель большую ошибку. Следовательно, задача идентификации модели (1), (2) по экспериментальным данным достаточно актуальна. Она заключается в подборе таких значений параметров  $\sigma$ ,  $A_1$  —  $A_3$ , при которых значения температур металла и газа, найденные как решения уравнения (1) с граничными условиями (2), в каждый момент времени наименее отличаются от тех же величин  $\hat{T}(t)$ ,  $\hat{T}_{\text{пч}}(t)$ , но полученных экспериментальным путем.

За меру отклонения данных параметров примем величину

$$G = \int_0^{t_k} \left[ \left( T(t) - \hat{T}(t) \right)^2 + \left( T_{\text{пч}}(t) - \hat{T}_{\text{пч}}(t) \right)^2 \right] dt, \quad (3)$$

где  $t_k$  — время, за которое проводились измерения экспериментальных значений (время идентификации).

Далее полагаем, что ошибки измерения экспериментальных значений  $\hat{T}(t)$ ,  $\hat{T}_{\text{пч}}(t)$  достаточно малы и ими можно пренебречь, а сами они могут

Расход газа в зависимости от времени

Время, с	Расход газа, м <sup>3</sup> /с	Время, с	Расход газа, м <sup>3</sup> /с	Время, с	Расход газа, м <sup>3</sup> /с
0	0,0200	22	0,0392	44	0,0465
2	0,0227	24	0,0401	46	0,0470
4	0,0263	26	0,0409	48	0,0475
6	0,0288	28	0,0416	50	0,0480
8	0,0308	30	0,0423	52	0,0485
10	0,0324	32	0,0430	54	0,0489
12	0,0339	34	0,0436	56	0,0494
14	0,0352	36	0,0443	58	0,0498
16	0,0363	38	0,0449	60	0,0502
18	0,0374	40	0,0454		
20	0,0383	42	0,0460		

быть получены в любой момент времени  $t \in [0, t_k]$ .

Для идентификации модели (1), (2) используем результаты промышленного эксперимента, приведенного в [4]. Значения расхода газа в момент времени  $t$  приведены в таблице.

Для определения значений  $\sigma$ ,  $A_1 - A_3$  считаем, что мера отклонения (3) является функцией переменных  $A_1 - A_3$ ,  $\sigma$ , т.е.

$$G = G(A_1, A_2, A_3, \sigma). \quad (4)$$

Из физических соображений имеем следующие ограничения на параметры:

$$A_1 \geq 0, A_2 \geq 0, A_3 \leq 0, \sigma \geq 0. \quad (5)$$

Таким образом, для того чтобы решить задачу идентификации, необходимо найти такие значения параметров  $A_1 = \bar{A}_1$ ,  $A_2 = \bar{A}_2$ ,  $A_3 = \bar{A}_3$ ,  $\sigma = \bar{\sigma}$ , которые удовлетворяли бы ограничениям (5), т.е. минимизировали бы функцию (4).

Следовательно, нами получена задача условной минимизации функции четырех переменных. Для ее решения используем метод покоординатного спуска, а также производственные данные при нагреве проволоки (высокоуглеродистая сталь) в печи патентирования РУП "Белорусский металлургический завод" [4]. Исходные данные для расчета: диаметр проволоки — 3,15 мм; производительность печи — 1900 кг/ч; начальная температура проволоки — 20 °С; конечная температура проволоки — 970 °С; теплотворная способность топлива —  $Q_p^p = 34,1$  МДж/м<sup>3</sup>. При этих данных получили следующие значения параметров:  $\bar{A}_1 = 1154,56$ ,  $\bar{A}_2 = 7,276 \cdot 10^{-12}$ ,  $\bar{A}_3 = -7,277 \cdot 10^{-12}$ ,  $\bar{\sigma} = 1,12 \cdot 10^{-10}$ .

На рис. 1 и 2 показаны графики изменения температуры греющей среды и заготовки, полученные экспериментальным и расчетным путем. Относительная погрешность идентификации менее 5%, что можно считать удовлетворительным.

Таким образом, с помощью промышленного эксперимента и предложенного алгоритма получены реальные значения параметров модели (1), что имеет практическое значение для изучения процесса нагрева металла в проходных печах с целью

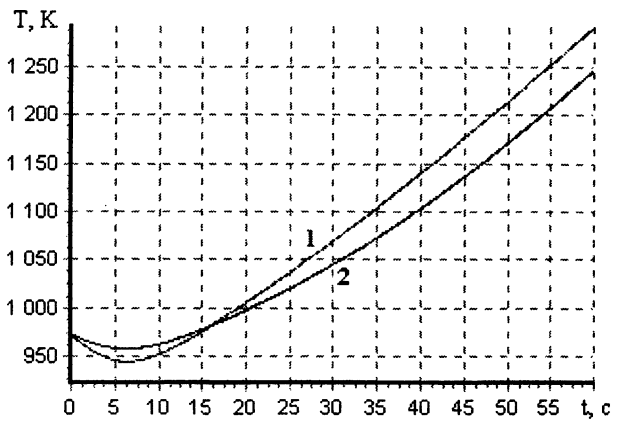


Рис. 1. Изменения температуры среды, полученные экспериментальным (1) и расчетным (2) путем

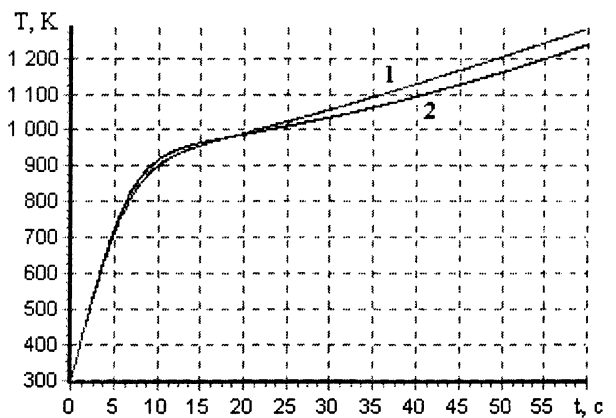


Рис. 2. Изменения температуры заготовки, полученные экспериментальным (1) и расчетным (2) путем

его последующей оптимизации.

### Литература

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Стальной слиток. В 3 т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Мн.: Выш. шк., 1992.
4. Разработка высокоэффективных режимов термической обработки кордовой стали в печах патентирования / В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов, А. Н. Савенок и др. // Изв. вузов и энерг. объединений СНГ. Энергетика. 2001. № 4. С. 61—67.