УДК 621.1.0.18

ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПРИ ТЕПЛООБМЕНЕ КОНВЕКЦИЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЕМ

Докт. техн. наук, проф. ***КОВАЛЕВСКИЙ В. Б.****, инж.* ***САИД А. Г., ПРОНЬ В. А.***

Белорусский национальный технический университет

Сложность процессов теплопередачи и 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. Для определения динамики изменения температур металла и печи необходимо уметь рассчитывать действительные значения коэффициентов модели.

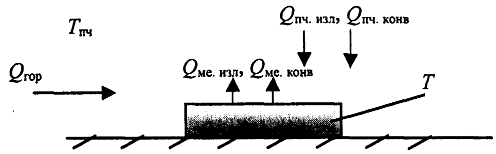

Рис. 1. Схема теплового баланса потоков

Из уравнения теплового баланса модель процесса нагрева термически тонких тел представим в виде:

$$\frac{dT_{пч}}{dt} = A_1 B(t) + A_2 T^4(t) +/ A_3 T_{пч}^4(t) + A_4 T(t) + A_5 T_{пч}(t);$$

$$\frac{dT}{dt} = \alpha(T_{пч} - T) + \sigma(T_{пч}^4 - T^4); \qquad (1)$$

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

где $T_{пч}(t)$, $T(t)$ – температуры греющей среды и нагреваемого металла в момент времени t соответственно; $B(t)$ – расход газа в момент времени t; t_k – время окончания процесса нагрева; $T_{г0}$, T_0, T_k – начальная температура греющей среды, нагреваемого металла и конечная температура металла соответственно; α, σ, $A_1 \ldots A_5$ – константы, характеризующие динамику процесса нагрева.

Величины $A_1 \ldots A_5$ определяются следующим образом:

$$A_1 = \frac{(Q_н^р + V_в c_в T_в + c_т T_т - V_д c_д T_{ух})\tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр}};$$

$$A_2 = \frac{P c_м \sigma \tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр} V};$$

$$A_3 = -\frac{P c_м \sigma \tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр} V} - \frac{2{,}2 F_{ст} \tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр} (S_1/\lambda_1 + S_2/\lambda_2 + 1/\alpha_с)};$$

$$A_4 = \frac{P c_м \alpha \tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр} V};$$

$$A_5 = -\frac{P c_м \alpha \tau}{1{,}1 M_{тр} c_{тр} V}.$$

Физический смысл всех величин можно найти в [1]. Попытка определить по справочным данным коэффициенты α, σ, $A_1 \ldots A_5$ наталкивается на следующие трудности: во-первых, печь представляет собой нагревательное устройство с присущими только ей конструктивными особенностями (например, расположение транспортных устройств и их массы); 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 α, σ, $A_1 ... A_5$, 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 $\widehat{T}_{\text{пч}}(t)$, $\widehat{T}(t)$, но полученных экспериментальным путем.

За меру отклонения данных параметров примем величину

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

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

Далее полагаем, что ошибки измерения экспериментальных значений $\widehat{T}_{\text{пч}}(t)$, $\widehat{T}(t)$ достаточно малы, и ими можно пренебречь, а сами они могут быть получены в любой момент времени $t \in [0,\ t_k]$.

Для определения значений α, σ, $A_1 ... A_5$ считаем, что мера отклонения (3) является функцией переменных α, σ, $A_1 ... A_5$, т. е.

$$G = G(\alpha, \sigma, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5). \qquad (4)$$

Из физических соображений имеем следующие ограничения на параметры:

$$\alpha \geq 0;\ \sigma \geq 0;\ A_1 \geq 0;\ A_2 \geq 0;\ A_3 \leq 0;\ A_4 \geq 0;\ A_5 \leq 0. \qquad (5)$$

Для того чтобы решить задачу идентификации, необходимо найти такие значения параметров: $\alpha = \overline{\alpha}$; $\sigma = \overline{\sigma}$; $A_1 = \overline{A}_1$; $A_2 = \overline{A}_2$; $A_3 = \overline{A}_3$; $A_4 = \overline{A}_4$; $A_5 = \overline{A}_5$, которые удовлетворяли бы ограничениям (5), т. е. минимизировали бы функцию (4).

Следовательно, нами получена задача условной минимизации функции семи переменных. Для ее решения используем адаптивный алгоритм случайного поиска и получим следующие значения параметров: $\sigma = 1{,}909961 \cdot 10^{-10}$; $\alpha = 1{,}505378 \cdot 10^{-04}$; $A_1 = 1{,}514586$; $A_2 = 2{,}934237 \cdot 10^{-11}$; $A_3 = -1{,}007342 \cdot 10^{-11}$; $A_4 = 1{,}062357 \cdot 10^{-02}$; $A_5 = -1{,}062357 \cdot 10^{-02}$.

На рис. 2 приведены графики изменения температуры греющей среды и заготовки, полученные экспериментальным и расчетным путем. Относительная погрешность идентификации – менее 6 %, что можно считать удовлетворительным.

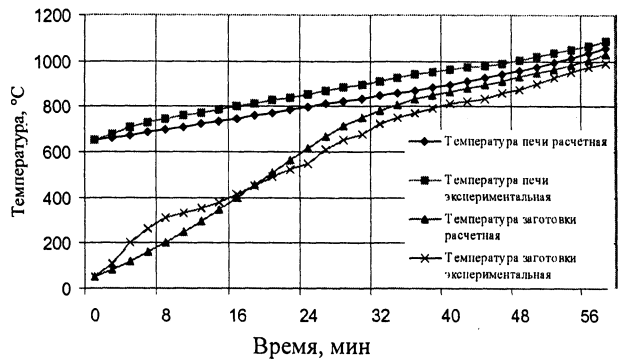

Рис. 2. Графики изменения температуры заготовки и температуры печи, полученные экспериментальным и расчетным путем

Таким образом, с помощью промышленного эксперимента и предложенного алгоритма получены реальные значения коэффициентов модели (1), что имеет практическое значение для изучения процесса нагрева металла в печах, позволяющее прогнозировать расход газа через горелочные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Теплообмен** и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. – Мн.: Вышэйш. шк., 1992. – 214 с.