



The data on investigation of optimization of technical-economical indices of the chamber furnace operation (heating furnace PVP-1) are given.

И. А. ТРУСОВА, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 669.04

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБОВ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ

Как было отмечено в работе [1], при разработке и последующем решении математической модели теплообмена в камерной нагревательной печи необходимо учитывать ряд параметров: форму, размер и количество заготовок, их химический состав; способ размещения заготовок на поду относительно друг друга, стен печи, а также относительно горелочных устройств; температурно-тепловой режим нагрева заготовок; вид теплообмена и т. д. Модель теплообмена в камерной нагревательной печи сводится к математической формулировке задачи сопряженного теплообмена между дымовыми газами, футеровкой печи и нагреваемым металлом с учетом перечисленных выше параметров.

В данной работе представлено решение задачи структурной идентификации математической модели теплообмена в камерной нагревательной печи.

Первым шагом решения задачи структурной идентификации является определение начальных условий и указанных выше зависимостей. В работе [2] некоторые зависимости были определены в явном виде:

$$\rho_{i,j,k}(T), \eta_j(T), p_0, U_{ns0}, T_{0i,j,k}, \quad (1)$$

где  $\rho_{i,j,k}(T)$ ,  $T_{0i,j,k}$  – плотность и начальные температуры футеровки ( $i$ ), печной атмосферы ( $j$ ) и заготовок ( $k$ );  $\eta_j(T)$ ,  $p_0$ ,  $U_{ns0}$  – газодинамические параметры (динамическая вязкость, начальное поле давлений, начальное поле скоростей) печной атмосферы.

Следующим шагом решения задачи структурной идентификации является совместное решение уравнений Навье–Стокса и уравнения теплообмена. Однако здесь важна последовательность решения этих уравнений. Следует отметить [3, с. 24], что «поле температур всегда самым существенным образом зависит от поля скоростей. В отно-

шении же поля скоростей можно выделить такие течения, в которых тепловое воздействие весьма мало по сравнению с воздействием внешнего побудителя движения. Поэтому в условиях вынужденной конвекции часто пренебрегают влиянием поля температур на поле скоростей и учитывают только обратное действие. Этот прием имеет важное методологическое значение, так как самым существенным образом упрощает исследование теплообмена в ряде практически важных задач с дозвуковыми скоростями».

Таким образом, следующим шагом решения задачи структурной идентификации является решение уравнений Навье–Стокса:

$$\rho_j \frac{\partial U_{ns}}{\partial t} + \rho_j (U_{ns} \nabla) U_{ns} = \nabla \left[ -pI + \eta_j (\nabla U_{ns} + (\nabla U_{ns})^T) \right] + F, \quad (2)$$

$$\nabla U_{ns} = 0,$$

где  $F$  – объемная сила;  $p$ ,  $U_{ns}$  – поля давлений и скоростей дымовых газов.

Результатом решения системы (2) является определение полей скоростей и давлений:

$$U_{ns}(x, y, z) = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$p = p(x, y, z).$$

На следующем шаге полученная система решений (3) используется при решении уравнения теплопереноса дымовыми газами:

$$\rho_j C_{pj} \frac{\partial T_j}{\partial t} + \nabla (-k_j \nabla T_j) = Q_j + q_{sj} T_j - \rho_j C_{pj} U_{ns} \nabla T_j, \quad (4)$$

где  $C_{pj}$ ,  $k_j$ ,  $Q_j$ ,  $q_{sj}$  – соответственно удельная теплоемкость, теплопроводность, внутренний источник

тепла, коэффициент излучения/поглощения печной атмосферы.

На границе печной атмосферы и футеровки происходит сопряженный теплообмен, связанный следующим граничным условием:

$$-n_j(-k_j \nabla T_j) - n_i(-k_i \nabla T_i) = \rho_j U_{ns} \left( \frac{C_{pj} T_j}{\gamma} + \frac{p}{\rho_j} + \frac{1}{2} U_{ns}^2 \right) + \varepsilon_i (G_i - \sigma T_i^4), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_i$ ,  $G_i$  – степень черноты и интегральный падающий поток на футеровку.

В футеровке печи происходит теплоперенос теплопроводностью

$$\rho_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla(k_i \nabla T_i). \quad (6)$$

Между заготовками, печной атмосферой и футеровкой осуществляется сопряженный теплообмен, связанный через граничное условие:

$$-n_j(-k_j \nabla T_j) - n_k(-k_k \nabla T_k) = \rho_j U_{ns} \left( \frac{C_{pj} T_j}{\gamma} + \frac{p}{\rho_j} + \frac{1}{2} U_{ns}^2 \right) + \varepsilon_k (G_k - \sigma T_k^4). \quad (7)$$

В заготовках теплоперенос происходит теплопроводностью:

$$\rho_k C_{pk} \frac{\partial T_k}{\partial t} = \nabla(k_k \nabla T_k). \quad (8)$$

Необходимо отметить, что в последнее время ведущими фирмами в области строительства металлургических печей исследуются и находят практическое применение различные способы интенсификации тепловой работы печей путем повышения конвективной составляющей теплообмена (в частности, за счет организации струйного конвективного теплообмена). Поэтому при реше-

нии задачи структурной идентификации математической модели (5), (7) нами учитывается конвективная составляющая в явном виде.

В качестве объекта моделирования выбран экспериментальный стенд печи ПВП-1, размещенный в ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси [4]. В основу моделирования положены экспериментальные результаты нагрева металла с предварительно прогретой печью (т. е. нагрев металла по режиму закалки), при этом условия проведенного эксперимента были максимально приближены к промышленным условиям. Температура в печи контролировалась термопарой.

С учетом этого решение задачи структурной идентификации математической модели теплообмена в камерной нагревательной печи можно упростить, представив уравнение (4) в виде

$$T_j = \text{const}. \quad (9)$$

Уравнение (5) можно записать в следующем виде:

$$-n_i(-k_i \nabla T_i) = \rho_j U_{ns} \left( \frac{C_{pj} T_j}{\gamma} + \frac{p}{\rho_j} + \frac{1}{2} U_{ns}^2 \right) + \varepsilon_i (G_i - \sigma T_i^4). \quad (10)$$

Уравнение (7) можно записать следующим образом:

$$-n_k(-k_k \nabla T_k) = \rho_j U_{ns} \left( \frac{C_{pj} T_j}{\gamma} + \frac{p}{\rho_j} + \frac{1}{2} U_{ns}^2 \right) + \varepsilon_k (G_k - \sigma T_k^4). \quad (11)$$

По упрощенным выражениям выполнены расчеты уравнений теплообмена между дымовыми газами, футеровкой и заготовками в камерной печи

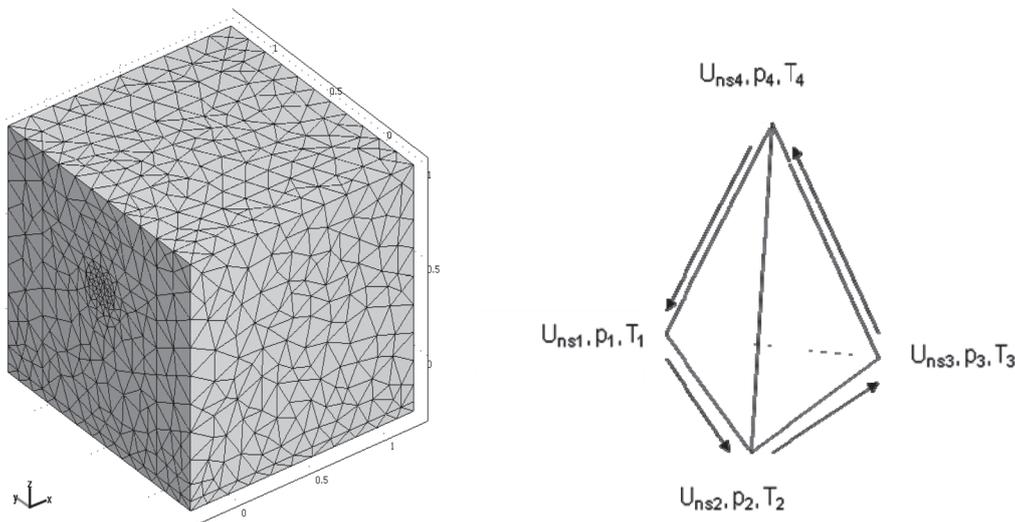


Рис. 1. Конечно-элементная схема разбиения расчетной области на тетраэдры

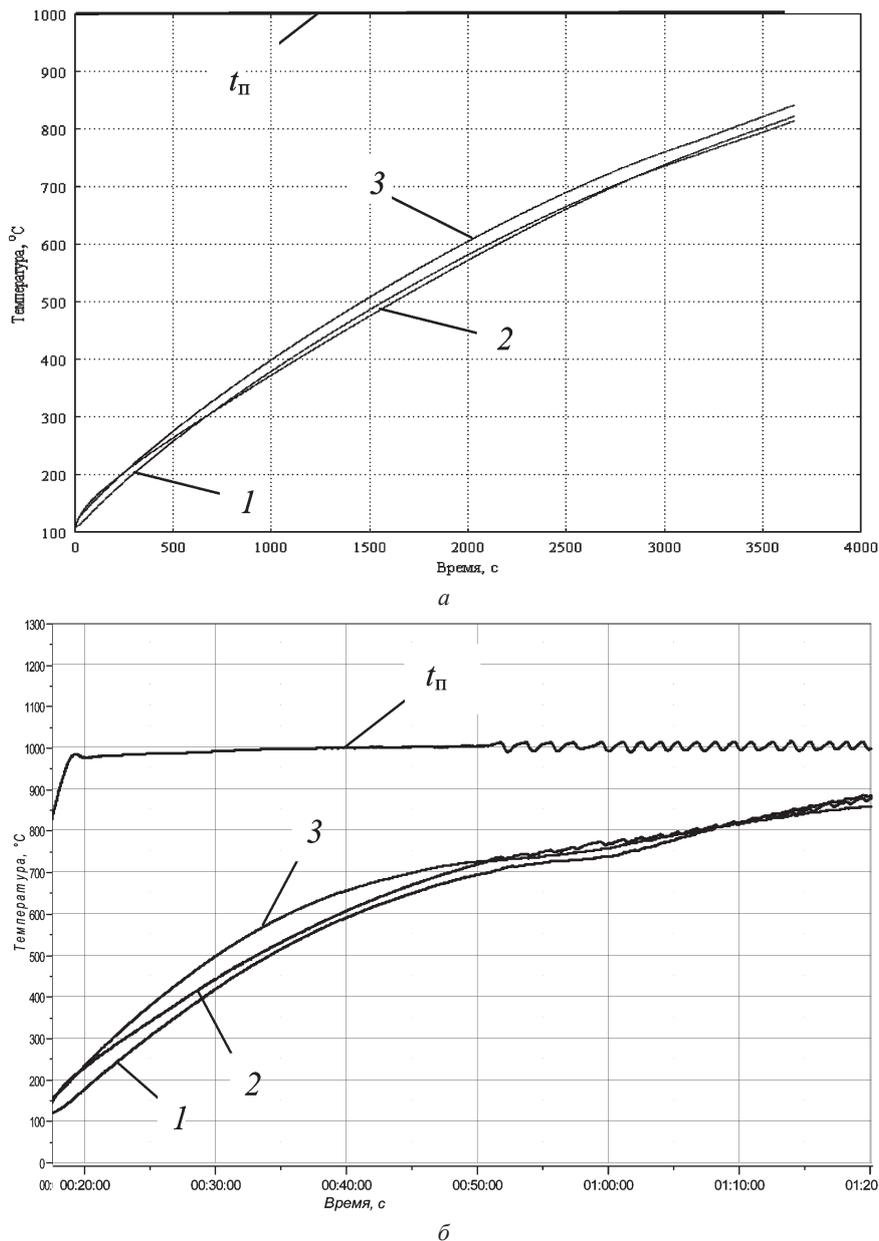


Рис. 2. Графики нагрева заготовок в контрольных точках 1–3: а – численный расчет МКЭ; б – проведенный эксперимент

ПВП-1. В качестве расчетного метода использован метод конечных элементов (МКЭ). На рис. 1 показана конечно-элементная схема с разбиением расчетной области на конечные элементы (тетраэдры).

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования и проведенного эксперимента. Показания температур считывали с термпар, размещенных соответствующим образом (рис. 3).

Аналогичным образом были проведены численные расчеты моделирования тепловой работы печи при различной установке боковых горелок. Относительная высота установки боковых горелок варьировалась от 0,429 до 0,714. В указанном диапазоне были рассчитаны тепловые режимы и коэффициент полезного действия (КПД) нагревательной установки. На рис. 4 приведена зависимость изме-

нения КПД от высоты установки боковых горелок [5]. Величину КПД определяли по выражению:

$$\text{КПД} = \frac{Q_{\text{усв.мет}}}{Q_{\text{х.т}}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где

$$Q_{\text{усв.мет}} = m \frac{1}{N_{ke}} \sum_{N_{ke}} \left( 0,25 \sum_{pk} C_{pk} T_k \right), \quad (13)$$

$$Q_{\text{х.т}} = \text{const},$$

где  $m$  – масса заготовок;  $N_{ke}$  – количество конечных элементов в области, приходящейся на заготовки;  $Q_{\text{усв.мет}}$  – полезная теплота, усвоенная металлом;  $Q_{\text{х.т}}$  – химическая теплота сгорания топлива.

Из рисунка видно, что при установке боковых горелок на уровне 0,429 относительно уровня

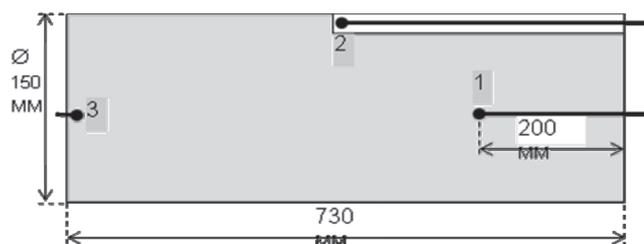


Рис. 3. Схема зачеканки термопар центральной заготовки в контрольных точках 1–3

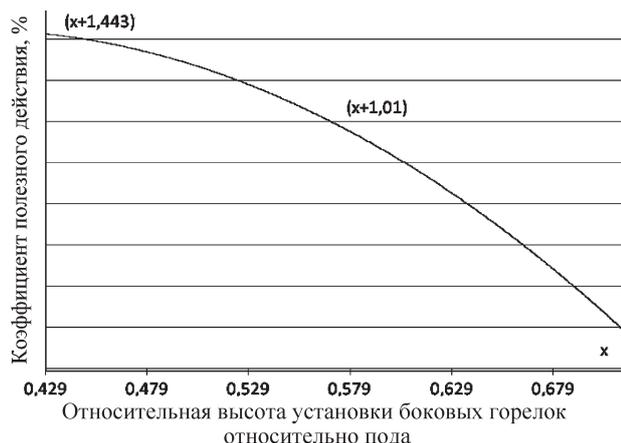


Рис. 4. Зависимость КПД камерной печи от высоты установки боковых горелок относительно пода

пода можно добиться повышения КПД печи на 1,5%.

В работе [1] была приведена расчетная схема данной печи в разрезе, проходящем через оси горелок и перпендикулярно плоскости  $XOY$ , а также таблица значений скоростей продуктов сгорания в определенных точках на поверхности заготовок. Показано, что наибольшей равномерности нагрева заготовок удастся добиться при установке боко-

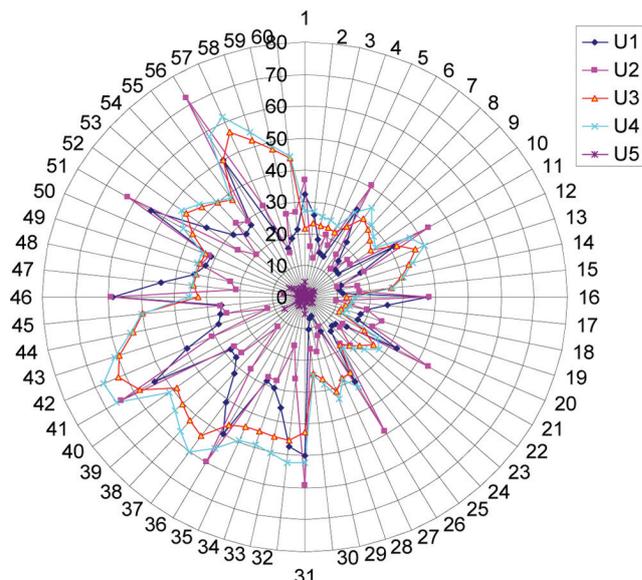


Рис. 5. Круговая гистограмма распределения скоростей в определенных точках [1]

вых горелок на уровне 0,475–0,575 относительно уровня пода. На рис. 5 полученные результаты представлены в виде круговой гистограммы, из которой видно, что при данном расположении горелок скорости дымовых газов лежат в одном сегменте (49, 50), т. е. обеспечивается равномерный нагрев заготовок по периметру.

Таким образом, как показали многочисленные расчеты, определение рационального места установки боковых горелок на уровне 0,429–0,475 относительно пода в рассмотренной печи дает как повышение коэффициента полезного действия печи на 1,5%, так и наибольшую равномерность обтекания заготовок дымовыми газами при струйном нагреве.

### Литература

1. Трусова И. А., Ратников П. Э., Менделев Д. В., Корнеев С. В. Выбор оптимальных конструктивных и технологических параметров пламенных печей камерного типа с высокоскоростными горелками с целью обеспечения равномерности нагрева // *Литье и металлургия*. 2010. № 1, 2. С. 220–223.
2. Трусова И. А., Менделев Д. В., Ратников П. Э., Корнеев С. В. Подбор конструктивных и технических параметров проходной нагревательной печи для нагрева заготовок под штамповку с целью создания энергосберегающих технологий // *Республ. межвед. сб. науч. трудов. «Металлургия»*. 2009. Вып. 32. С. 30–39.
3. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
4. Трусова И. А., Менделев Д. В. и др. Расчет и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла // *Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика*. 2008. № 4. С. 34–43.
5. Трусова И. А., Менделев Д. В., Корнеев С. В., Ратников П. Э. Анализ и выбор расчетных методик сжигания топлива в газопламенных печах // *Литье и металлургия*. 2009. № 4. С. 157–160.