

**Ю.Г. Качан, д-р техн. наук**

(Украина, Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия),

**А.В. Николенко, канд. техн. наук., В.В. Степкин**

(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия)

## АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Современные методические печи с шагающими балками для нагрева заготовок являются крупным потребителем газообразного топлива, доля которого составляет 16-18% от всех затрат энергоресурсов в металлургическом производстве. Работа методических печей характеризуется рядом показателей, наиболее важными из которых являются температурный и тепловой режим, расход топлива. Возможность создания рациональной картины температурного режима в методической печи позволит решить две актуальные проблемы: интенсификацию металлургического процесса и экономию газа.

**Цель работы.** В работе решается задача проверки адекватности математической модели методической печи, разработанной на основании известных теплотехнических законов [1].

### Изложение основных материалов исследования

Математическое описание такого сложного объекта, как методическая печь, приводит к значительным трудностям при вычислениях. При составлении математической модели она была разделена на четыре части. Каждая часть при этом отвечает за определенные физические процессы, происходящие в печи.

Первая часть модели отражает процесс горения топлива в методической печи. В исследуемом объекте сжигается природный и обогащенный доменные газы [1]. Второй частью модели является расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи, с помощью которого определяется приведенный коэффициент излучения от газов и кладки на металл. Здесь теплообмен излучением является основным способом передачи тепла, около 85-95% тепла в печи передается на поверхность нагреваемого металла излучением и лишь 5-15% – конвекцией [2]. Третья часть модели включает в себя расчет нагрева металла в методической печи, основной задачей которого есть определение температуры металла и перепада температур по сечению на разгрузочной стороне печи [3]. Четвертая часть модели представляет собой расчет теплового баланса методической печи [4].

Разработанная авторами модель методической печи предназначена для расчета температуры металла на разгрузочной ее стороне. Зональный расход топлива определяется по формуле [4]

$$V_i = \frac{M_{\text{общі}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{общ}}^i$  – общая тепловая мощность по зонам печи, МВт;  $Q_n^p$  – теплота сгорания топлива, МДж/м<sup>3</sup>.

На основании [1 – 4] выведем формулу связи расхода газа с теплосодержанием металла:

$$B_i = \frac{i_{\text{ни}} \cdot (100 \cdot G - G \cdot \delta) - i_{\text{ки}} \cdot (100 \cdot G - G \cdot \delta) - Q_{\text{усв.FEi}} + Q_{5i}}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{общ}}^i} \quad (2)$$

Теплосодержание металла в конце  $i$ -й зоны рабочего пространства печи найдем по формуле:

$$i_{\text{ки}} = B_i \cdot \frac{Q_n^p \cdot \eta_{\text{общ}}^i}{G \cdot (100 - \delta)} + \frac{Q_{\text{усв.FEi}}}{G \cdot (100 - \delta)} - \frac{Q_{5i}}{G \cdot (100 - \delta)} + i_{\text{ни}}, \quad (3)$$

где  $\eta_{\text{общ}}^i$  – коэффициент использования химической энергии топлива;  $G$  – установленная производительность печи, кг/с;  $\delta$  – угар металла, %;  $Q_{\text{усв.FEi}}$  – тепло, усвоенное металлом от окисления железа по зонам печи, МВт;  $Q_{5i}$  – общие потери тепла  $i$ -й зоны рабочего пространства печи, МВт;  $i_{\text{ни}}$  – теплосодержание металла в начале  $i$ -й зоны рабочего пространства печи, МДж/м<sup>3</sup>.

Исследуемая печь разбита на пять зон: рекуперативная, подогрева, нагрева 1, нагрева 2, томильная. Зная марку стали и теплосодержание металла томильной зоны  $i_{\text{к5}}$ , можно определить его разгрузочную температуру  $T_5$ .

Проверка адекватности математической модели проводилась в ОАО ППКИ "Металлургавтоматика" на основании данных, полученных в листопрокатном цехе ММК им. Ильича (ЛПЦ-1700) при выполнении проекта "Информационная система сопровождения при транзитной прокатке "Слябинг 1150 – ЛПЦ1700". Для указанной модели были взяты экспериментальные данные, при нагреве партий литых слябов 250x1250x10500, низкоуглеродистой стали 12ГС, 09Г2, 09Г2С (ГОСТ 19281), загрузочной температуры 20 °С.

Погрешность моделирования определялась согласно [5]. Соответствие прогнозируемой разгрузочной температуры металла действительной представим в виде

$$T_{\text{п}}^* = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot T_{\text{д}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_0 = \bar{T}_{\text{п}} - r_{\text{ТдТп}} \cdot \sigma_{\text{Тп}} / \sigma_{\text{Тд}} \cdot \bar{T}_{\text{д}}$ ;  $\alpha_1 = r_{\text{ТдТп}} \cdot \sigma_{\text{Тп}} / \sigma_{\text{Тд}}$ .

Здесь  $\bar{T}_{\text{д}}$ ,  $\bar{T}_{\text{п}}$  – средние значения действительной и прогнозируемой температуры металла в томильной зоне;  $r_{\text{ТдТп}}$  – коэффициенты корреляции между этими значениями;  $\sigma_{\text{Тп}}$ ,  $\sigma_{\text{Тд}}$  – среднеквадратичные отклонения.

Указанные величины вычислялись по формулам:

$$r_{T_n T_d} = \frac{\sum_{i=1}^L (T_{d_i} - \bar{T}_d) \cdot (T_{n_i} - \bar{T}_n)}{L \cdot \sigma_{T_n T_d}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{T_d} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (T_{d_i} - \bar{T}_d)^2 / (L-1)}; \quad (6)$$

$$\sigma_{T_n} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (T_{n_i} - \bar{T}_n)^2 / (L-1)}, \quad (7)$$

где  $L$  – объем статической выборки.

Среднеквадратичная абсолютная ошибка определялась как

$$\Delta T_n = t_p \cdot \sigma_{T_n}^*, \quad (8)$$

где  $t_p$  – коэффициент Стьюдента, определяемый по таблицам соответствующего распределения. Здесь  $\sigma_{T_n}^*$  – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_{T_n}^* = \sqrt{\sum_{i=1}^L (T_{n_i} - T_{n_i}^*)^2 / (L-1)}. \quad (9)$$

В результате среднеквадратичная относительная ошибка прогноза определяется следующим образом:

$$\delta_{T_n} = |\Delta T_n| / T_{n_{\max}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $T_{n_{\max}}$  – предельное значение прогнозируемой температуры.

Результаты вычислений для среднестатистической выборки  $L=200$  представлены на рисунке.

### Вывод

В результате проверки математической модели методической печи, подтверждена ее адекватность с погрешностью не более 3%. По завершении испытаний,

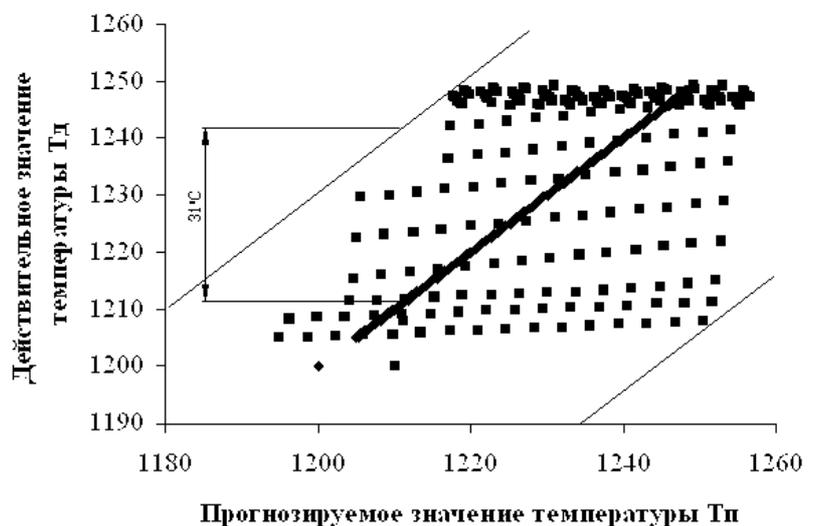


График отклонения расчетных параметров модели от действительных

которые проводились совместно с ОАО ППКИ "Металлургавтоматика" составлен акт проверки адекватности математической модели методической печи с шагающими балками.

#### Список литературы

1. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Степкин В.В. Алгоритм расчета процесса горения топлива в методической печи // Теория и практика металлургии. – 2007. – №2-3. – С. 131-134.
2. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Степкин В.В. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве методической печи // Теория и практика металлургии. – 2007. – №4-5. – С. 77-78.
3. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Степкин В.В. Моделирование процесса нагрева металла в методической печи // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – № 5. – С.74-76.
4. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Степкин В.В. Алгоритм расчета теплового баланса методической печи // ЗГИА, Металлургия (Наукові праці ЗДІА). – 2007 – Вип.16. – С. 120-126.
5. Лукомский Ф. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. – М.: Госстатиздат, 1958. – 120 с.