

Ю.Г. Качан ⁽¹⁾, зав. кафедрой, профессор, д.т.н.

В.В. Степкин ⁽²⁾, доцент, к.т.н.

Ю.Б. Спекторова ⁽¹⁾, аспирант

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ВЫКАТНЫМ ПОДОМ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск

Виконано перевірку адекватності розробленої математичної моделі об'ємного розподілу температурного поля камерної нагрівальної печі з викатним подом.

Выполнена проверка адекватности разработанной математической модели объемного распределения температурного поля камерной нагревательной печи с выкатным подом.

Введение. Основными показателями, которые оказывают влияние на энергоэффективность камерных нагревательных печей являются температурный и тепловой режим. Создание рациональной картины распределения температурного поля в печи позволит решить две актуальные проблемы: интенсификацию металлургического процесса и повышение энергоэффективности агрегата.

Математическое описание распределения температуры в объеме камеры такого сложного технологического объекта как нагревательная печь периодического действия связано со значительными трудностями при вычислениях. В связи с этим оно было условно разделено на две части: первая, основанная на инженерной методике расчета, характеризует физические процессы, происходящие в печи, а вторая, основанная на численных методах вычислений, позволяет рассчитать распределение температуры в объеме камеры.

Исходными данными математической модели являются: режимы термообработки в камерной печи с выкатным подом (отжиг, отпуск и закалка); размеры заготовок нагреваемого металла (длина, ширина и толщина); масса и качество металла; вид топлива – природный газ с теплотой сгорания. Расчет распределения температуры выполняли с использованием численного метода и известной инженерной методики [1], которая позволила учитывать различные варианты способов отопления и изменение аэродинамических параметров печи (размеров и места расположения в ней вытяжных окон).

Вычисления выполняли в следующей последовательности:

- расчет теплообмена в рабочем пространстве печи в период ее разогрева;
- расчет нагрева металла;
- расчет теплообмена в рабочем пространстве печи в период ее охлаждения;
- расчет охлаждения металла;
- составление теплового баланса периодов нагрева и выдержки.

Особенность расчета теплообмена излучением для камерных печей заключается в том, что кладка в них не является адиабатной, а поглощает или отдает теплоту. Во время загрузки холодного металла имеет место охлаждение кладки, поэтому в первый период нагрева она является существенным потребителем теплоты и уровень ее температуры сильно отличается от адиабатной до тех пор, пока с течением времени кладка не прогревается.

Прогнозируемую температуру T_n в точке с заданными координатами определяют с использованием дискретного уравнения, отражающего интенсивность переноса теплоты через поверхность контрольного объема:

$$T_A = \frac{a_{x3} \cdot T_{x3} + a_{x4} \cdot T_{x4} + a_{y3} \cdot T_{y3} + a_{y4} \cdot T_{y4} + a_{z3} \cdot T_{z3} + a_{z4} \cdot T_{z4}}{a_A}, \quad (1)$$

где a_{x3} , a_{x4} , a_{y3} , a_{y4} , a_{z3} , a_{z4} – коэффициенты проводимости между точкой A и соседними точками в трехмерном пространстве (x, y, z) ; T_{x3} , T_{x4} , T_{y3} , T_{y4} , T_{z3} , T_{z4} – значения расчетной температуры печи между теми же точками, полученные в первой части модели, °С; a_A – коэффициент точки задания A , который представляет собой сумму всех вышеперечисленных соседних коэффициентов проводимости.

Теоретические усредненные температуры печи T_Γ и кладки T_K в зоне, где установлено измерительное средство, рассчитывают по формулам [1]:

$$T_\Gamma = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{T_M + 273}{100}\right)^4 + \left[\left(\frac{T_{кл} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_M + 273}{100}\right)^4\right]}{\left[1 + \varphi_{кл.м} \cdot \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\varepsilon_M \cdot (1 - \varepsilon_2)}{1 + \varphi_{кл.м} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - \varepsilon_M)}\right]^{-1}}} - 273; \quad (2)$$

$$T_{кл} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{T_M + 273}{100}\right)^4 + \left[\left(\frac{T_2 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_M + 273}{100}\right)^4\right]}{\left[1 + \varphi_{кл.м} \cdot \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\varepsilon_M \cdot (1 - \varepsilon_2)}{1 + \varphi_{кл.м} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - \varepsilon_M)}\right]^{-1}}} - 273, \quad (3)$$

где T_M – температура металла, °С; $T_{кл}$ – температура кладки печи, °С; $\varphi_{кл.м}$ – угловой коэффициент излучения кладки на металл; ε_M , ε_2 – степень черноты металла и продуктов сгорания соответственно.

В качестве исходных данных, при расчете температуры в камере печи T_n были использованы измеренные значения температуры в двух ее указанных зонах. Изменение прогнозируемой (модельной) T_n и действительной температуры T_δ во времени приведено на рис. 1. Значения T_δ соответствуют температуре свода камерной печи, измеренной при помощи термопары типа ПП и записанной на приборе КСП-3 в условиях ЗАО «Никопольский завод технологической оснастки».

Постановка задачи. Целью настоящей работы является проверка адекватности математической модели камерной нагревательной печи с выкатным подом в условиях реального производства.

Изложение основных материалов исследования. Погрешность моделирования определяли согласно методике работы [2]. При этом соответствие прогнозируемой температуры печи действительной представляли в виде:

$$T_n^* = a_0 + a_1 \cdot T_\delta, \quad (4)$$

где $a_0 = \bar{T}_n - \frac{r_{T_\Delta T_n} \cdot \sigma_{T_n}}{\sigma_{T_\Delta} \cdot T_\Delta}$; $a_1 = \frac{r_{T_\Delta T_n} \cdot \sigma_{T_n}}{\sigma_{T_\Delta}}$, a_0, a_1 – эмпирические коэффициенты при расчете прогнозируемых температур, $a_0 = 0,87$; $a_1 = 0,98$;



Рисунок 1 – Изменения во времени действительной T_Δ и прогнозируемой T_n температуры свода камерной нагревательной печи

здесь $\bar{T}_\Delta, \bar{T}_n$ – средние значения действительной (показания термопары) и прогнозируемой температуры печи соответственно; $r_{T_\Delta T_n}$ – коэффициенты корреляции между вышеуказанными значениями температуры; $\sigma_{T_\Delta}, \sigma_{T_n}$ – среднеквадратичные отклонения.

Указанные величины вычисляли по формулам:

$$r_{T_n T_\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^L (T_\Delta - \bar{T}_\Delta) \cdot (T_n - \bar{T}_n)}{L \cdot \sigma_{T_n T_\Delta}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{T_\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (T_\Delta - \bar{T}_\Delta)^2}{L-1}}, \quad (6)$$

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

где L – объем статистической выборки.

Среднеквадратичную абсолютную ошибку определяют как

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

где t_p – коэффициент Стьюдента, который принимают по таблицам соответствующего распределения; $\sigma_{T_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, рассчитывают по формуле:

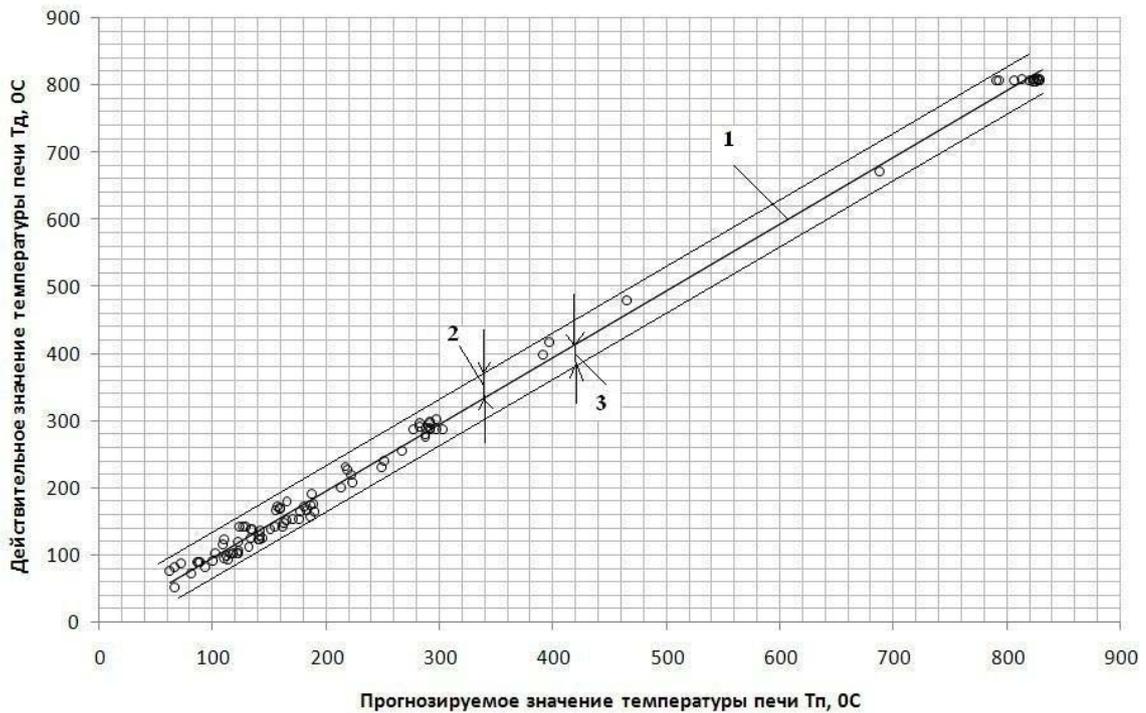
$$\sigma_{T_n}^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L (T_n - \bar{T}_n^*)^2}{L-1}} \quad (9)$$

где \bar{T}_n^* – среднее значение соответствия прогнозируемой и действительной температуры.

Тогда среднеквадратичная относительная ошибка прогноза составляет

$$\delta_{T_n} = \frac{|\Delta T_n|}{T_{n \max}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

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



$$1 - T_n^* = a_0 + a_1 \cdot T_\partial ;$$

$$2 - (+\sigma_{T_n}^*); \quad 3 - (-\sigma_{T_n}^*)$$

Рисунок 2 – График отклонения расчетной температуры от ее действительных значений

Результаты вычислений температуры для среднестатистической выборки $L = 94$ представлены на рис. 2, а результаты расчетов указанной выше ошибки прогноза ($\sigma_{T_n}, \sigma_{T_\partial}$ – среднеквадратичские отклонения, $r_{T_\partial T_n}$ – коэффициент

корреляции, $\sigma_{T_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, \bar{T}_n^* – среднее значение соответствия прогнозируемой и действительной температуры печи, ΔT_n , δ_{T_n} – соответственно среднеквадратичная абсолютная и относительная ошибки прогноза – в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты вычислений ошибки прогноза температуры

Средние значения действительной и прогнозируемой температуры печи, °С		Среднеквадратичные отклонения		Коэффициент корреляции	Остаточное среднеквадратичное отклонение	Среднее значение соответствия прогнозируемой и действительной температуры печи, °С	Коэффициент Стьюдента	Среднеквадратичная абсолютная, °С и относительная ошибка, %, прогноза	
\bar{T}_δ	\bar{T}_n	σ_{T_δ}	σ_{T_n}	$r_{T_n T_\delta}$	$\sigma_{T_n}^*$	\bar{T}_n^*	t_p	ΔT_n	δ_{T_n}
861,50	828,0	243,04	240,77	0,98	24,97	844,69	1,39	34,70	3,9

Заключение. В результате проверки математической модели камерной нагревательной печи с выкатным подом подтверждена ее адекватность реальным процессам. Относительная погрешность расчетов с использованием предложенной инженерной методики не превышает 4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качан Ю. Г. Математическая модель камерной нагревательной печи / Ю. Г. Качан, В. В. Степкин, Ю. Б. Спекторова // Энергетика : економіка, технології, екологія. – 2011. – № 4. – С. 54-61.
2. Лукомский Ф. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства / Ф. И. Лукомский. – М. : Госстатиздат, 1958. – 120 с. – Библиогр. : с. 118-119.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2011 р.

Рецензент, проф. О.В. Волков