

The article gives analytical solution to the problem of nonsymmetric heating of blooms in continuous furnaces based on the "equivalent sources method". Parametrical identification by the results of industrial experiments has shown sufficient accuracy and reliability of the method.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА,
Э. О. ЦКТИШВИЛИ, П. Я. ЛАКТИОНОВ,
Н. А. КИЯШКО, БГПА,
Алчевский металлургический комбинат

УДК 669.046

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА СТАЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ ТОЛКАТЕЛЬНОГО ТИПА

Дальнейшее развитие теории и практики технологии нагрева стали является одной из актуальных прикладных проблем черной металлургии. Для расчетов режимов нагрева стали в высокотемпературных промышленных печах используются как численные, так и аналитические методы решения задачи теплопереноса. В БГПА в течение последних 15 лет отрабатываются различные методики расчета [1—5] с целью выбора упрощенного, но достаточно надежного способа расчета нагрева термомассивных тел. Авторы остановили свой выбор на методе решения задачи нагрева методом эквивалентных источников (МЭИ), основы которой изложены в работах [3—5] на примере симметричного нагрева металла. В настоящее время этот метод модернизирован для случая несимметричного нагрева тел классической формы. Использование приближенных аналитических методов целесообразно для последующего расчета термических напряжений при нагреве высокоуглеродистых и легированных сталей, составления тепловых балансов и исследования закономерностей нагрева без применения ЭВМ. Поиск такого пути не потерял своей актуальности и сегодня.

Учитывая изложенное выше, запишем математическую модель нагрева пластины в безразмерных величинах:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[(1 + \varepsilon_\lambda) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right] = (1 + \varepsilon_c \theta) \frac{\partial \theta}{\partial Fo}, \quad (1)$$

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0, \quad (2)$$

$$(1 - \varepsilon_\lambda \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \theta} \Big|_{\xi=0} = -Sk_1 [1 - \theta_{n1}^4(Fo)] - Bi_1 [1 - \theta_{n1}(Fo)], \quad (3)$$

$$(1 - \varepsilon_\lambda \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \theta} \Big|_{\xi=1} = Sk_2 [1 - \theta_{n2}^4(Fo)] + Bi_2 [1 - \theta_{n2}(Fo)], \quad (4)$$

где

$$\theta(\xi, Fo) = \frac{T(\xi, \tau) - T_c}{T_0 - T_c}; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_c}; \quad \xi = \frac{r}{R}; \quad Fo = \frac{a_0 \tau}{R^2};$$

$$Sk = \frac{\sigma_b T_c^3 R}{\lambda_0}; \quad Bi = \frac{a_k R}{\lambda_0}; \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda T_c}{\lambda_0}; \quad \varepsilon_c = \frac{\delta_c T_c}{c_v^0}.$$

Индексы "1" и "2" относятся соответственно к верхней и нижней поверхностям пластины.

Для обеспечения необходимой точности решение проведено в рамках модели термического слоя. Опуская математические выкладки, запишем итоговые соотношения.

Инерционный этап ($0 \leq Fo \leq Fo_0$).

Температура поверхности:

$$\theta_{n1} = \theta_0 + \frac{\chi Sk_1}{2} \sqrt{6Fo}, \tag{5}$$

$$\theta_{n2} = \theta_0 + (1 - \theta_0) \frac{Bi_2 + Sk_2(1 + \theta_0)(1 + \theta_0^2)}{2 + Bi_2 + Sk_2(1 + \theta_0)(1 + \theta_0^2)\sqrt{6Fo}}, \tag{6}$$

где

$$\chi = 1 + 0,275 \frac{Bi_1}{Sk_1^2},$$

время протекания инерционного этапа:

$$Fo_0 = \frac{1}{6} (1 - l_1^0), \tag{7}$$

где

$$l_1^0 = \frac{1}{2} \left(1 - 2 \frac{Sk_1(1 + \chi) + Bi_1(1 - \theta_0)}{\chi Sk_1 Bi_1} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{8}{Bi_1 \left(1 - 2 \frac{Sk_1(1 + \chi) + Bi_1(1 - \theta_0)}{\chi Sk_1 Bi_1} \right)}} \right),$$

температура по сечению:

$$\theta_j(\xi_j, Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_0)^2 + [(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{nj})^2 - (1 + \varepsilon_\lambda \theta_0)^2]} \left(1 - \frac{\xi_j}{l_j} \right)^2 - 1 \right\}, \tag{8}$$

где

$$l_j(Fo) = \frac{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{nj}(Fo))^2 - (1 + \varepsilon_\lambda \theta_0)^2}{\varepsilon_\lambda [Sk_j(1 - \theta_{nj}^4(Fo)) + Bi(1 - \theta_{nj}(Fo))]}.$$

Регулярный этап ($Fo_0 \leq Fo \leq \infty$).

Температура по сечению тела:

$$\theta(\xi, Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \times \left\{ \sqrt{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})^2 + \varepsilon_\lambda \frac{Bi_2(1 - \theta_{n1})}{1 + \frac{Bi_2}{2(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})}} \xi^2 + \varepsilon_\lambda \left[\frac{1 + \frac{Bi_2}{1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1}}}{1 + \frac{Bi_2}{2(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})}} \xi^2 - 2\xi \right] [Sk(1 - \theta_{n1}^4) + Bi(1 - \theta_{n1})] - 1} \right\}.$$

Температуры поверхностей $\theta_{n1}(Fo)$ и $\theta_{n2}(Fo)$ определяем исходя из принципа суперпозиции. Для этого используем решения задач одностороннего нагрева пластины с тепловой изоляцией на противоположной стороне.

При одностороннем радиационно-конвективном нагреве температура поверхности рассчитывается по трансцендентному выражению:

$$\Omega(\bar{\theta}_{n1}) - \Omega(\bar{\theta}_{n1}^0) = (Sk_1 + Bi_1)(Fo - Fo_0), \tag{9}$$

где

$$\Omega(\bar{\theta}_{n1}) = \sum_{i=1}^4 a_i \varphi_i(\bar{\theta}_{n1});$$

$$a_1 = 1 - \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_\lambda}{3(1 + \varepsilon_\lambda)} (4\varepsilon_\lambda^2 \text{Sk}_1 - \text{Bi}_1);$$

$$a_2 = -\frac{4\varepsilon_\lambda(\varepsilon_c - \varepsilon_\lambda) \text{Sk}_1 - (\varepsilon_c - \varepsilon_\lambda^2) \text{Bi}_1}{3(1 - \varepsilon_\lambda^4)};$$

$$a_3 = \varepsilon_c - \frac{4\varepsilon_\lambda(\varepsilon_c - \varepsilon_\lambda) \text{Sk}_1 - (\varepsilon_c - \varepsilon_\lambda^2) \text{Bi}_1}{3(1 - \varepsilon_\lambda^4)};$$

$$a_4 = \frac{4(1 - \varepsilon_c \varepsilon_\lambda^3) \text{Sk}_1 - \varepsilon_\lambda(1 - \varepsilon_\lambda \varepsilon_c) \text{Bi}_1}{3(1 - \varepsilon_\lambda^4)};$$

функции φ_1 — φ_4 зависят только от θ_n и для удобства использования могут быть представлены в графической форме или в виде таблицы (табл.1).

Таблица 1. Значения функций $\varphi_i(\theta_n)$

θ_n	$\varphi_1(\theta_n)$	$\varphi_2(\theta_n)$	$\varphi_3(\theta_n)$	$\varphi_4(\theta_n)$
0,10	0,1000	0,0003	0,0050	0,00003
0,20	0,2001	0,0027	0,0200	0,004
0,30	0,3005	0,0090	0,0451	0,0020
0,40	0,4021	0,0216	0,0807	0,0064
0,50	0,5065	0,0429	0,1278	0,0161
0,60	0,6168	0,0764	0,1884	0,0347
0,70	0,7390	0,1283	0,2680	0,0686
0,80	0,8876	0,2120	0,3791	0,1317
0,85	0,9804	0,2759	0,4564	0,1845
0,90	1,1025	0,3697	0,5635	0,3669
0,92	1,1664	0,4226	0,6217	0,3153
0,94	1,2463	0,4918	0,6960	0,3795
0,96	1,3555	0,5905	0,7998	0,4716
0,98	1,5367	0,7614	0,9755	0,6391
0,99	1,7137	0,9333	1,1501	0,8085
0,999	2,2925	1,5076	1,7267	1,3804

Температуру противоположной (теплоизолированной) поверхности по известной $\bar{\theta}_{n1}(Fo)$ определяем по формуле:

$$\bar{\theta}_{n1}(Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left(\sqrt{\left(1 + \varepsilon_\lambda \bar{\theta}_{n1}(Fo) - \varepsilon_\lambda \left(\text{Sk}_1 \left(1 - \bar{\theta}_{n1}^4(Fo) \right) \right) + \text{Bi}_1 \left(1 - \bar{\theta}_{n1}(Fo) \right) \right)^2} - 1 \right). \quad (10)$$

Нижнюю температуру поверхности при одностороннем нагреве ($\varepsilon_\lambda = 0$) вычисляем следующим образом:

$$\bar{\theta}_{n2}(Fo) = 1 - (1 - \theta_0) \frac{2}{2 + \text{Bi}_2 + \text{Sk}_2 \left(1 + \bar{\theta}_{n2}^0 \right) \left(1 + \left(\bar{\theta}_{n2}^0 \right)^2 \right)} \times \exp \left(- \frac{3 \left(\text{Bi}_2 + \text{Sk}_2 \left(1 + \bar{\theta}_{n2}^0 \right) \left(1 + \left(\bar{\theta}_{n2}^0 \right)^2 \right) \right)}{3 + \text{Bi}_2 + \text{Sk}_2 \left(1 + \bar{\theta}_{n2}^0 \right) \left(1 + \left(\bar{\theta}_{n2}^0 \right)^2 \right)} (Fo - Fo_0) \right). \quad (11)$$

Температура противоположной стороны рассчитывается так:

$$\bar{\theta}_{n2}(Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left(\sqrt{\left(1 + \varepsilon_\lambda \bar{\theta}_{n2}(Fo)^2 - \varepsilon_\lambda \left(\text{Bi}_2 + \text{Sk}_2 \left(1 + \bar{\theta}_{n2} \right) \left(1 + \bar{\theta}_{n2}^2 \right) \right) \left(1 - \bar{\theta}_{n2}(Fo) \right) \right)^2} - 1 \right). \quad (12)$$

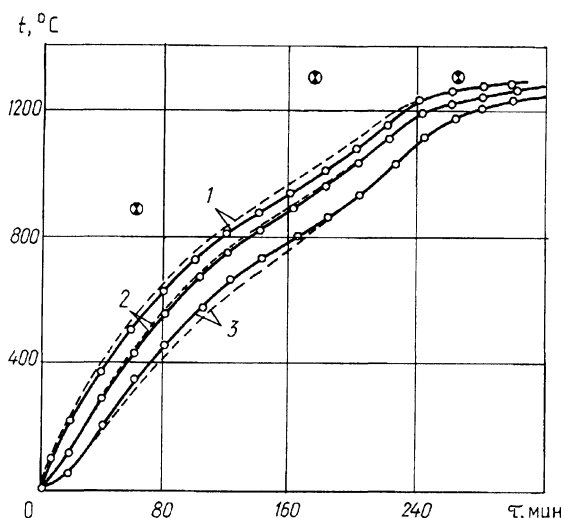


Рис. 1. Сравнение расчетных (---) и экспериментальных данных (—○—) нагрева блюма размером 0,27 м: 1, 2, 3 — соответственно температуры верхней, нижней поверхностей и центра

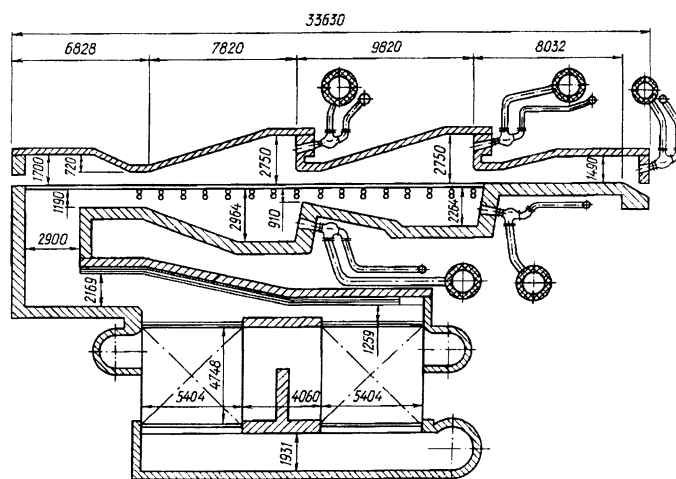


Рис. 2. Схема методической печи стана 600 Алчевского металлургического комбината

Имея частные решения (9) — (12) при одностороннем нагреве, температуры поверхности при двустороннем несимметричном нагреве будем определять следующим образом:

$$\theta_{n1}(Fo) = \bar{\theta}_{n1}(Fo) + \bar{\theta}_{u2}(Fo), \tag{13}$$

$$\theta_{n2}(Fo) = \bar{\theta}_{n2}(Fo) + \bar{\theta}_{u1}(Fo). \tag{14}$$

Т а б л и ц а 2. Пример расчета массивной пластины при $\theta_0 = 0,15$, $Sk = 0,5$

Fo	θ_n		$\delta, \%$	θ_n		$\delta, \%$
	численное решение	(7)—(14)		численное решение	(7)—(14)	
0.2	0,3984	0,4086	2,52	0,1804	0,1782	1,05
0.4	0,5008	0,5124	2,27	0,2665	0,2611	2,03
0.6	0,5855	0,5978	2,06	0,3597	0,3519	2,17
0.8	0,6595	0,6722	1,9	0,4494	0,4390	2,31
1.0	0,7131	0,728	2,04	0,5327	0,5203	2,32
1.2	0,7766	0,7909	1,81	0,6082	0,5930	2,50
1.4	0,8207	0,8350	1,71	0,6748	0,6581	2,47
1.6	0,8566	0,8703	1,57	0,7324	0,7150	2,37
1.8	0,8857	0,8974	1,30	0,7815	0,7658	2,01
2.0	0,909	0,920	1,21	0,8226	0,8050	2,14

Для оценки точности и области применения полученного решения (7) — (14) был рассчитан пример нагрева массивной пластины на основе численного решения. В табл. 2 приведены результаты сопоставления данных расчета симметричного нагрева по приближенному методу с результатами численного решения исходной задачи на ЭВМ [6]. Из таблицы видно, что абсолютная максимальная погрешность не превышает 2,52%. Это свидетельствует о конкурентоспособности разработанного приближенного метода с численным.

В дальнейшем аналитическое решение (5)—(14) несимметричного нагрева блюмов было использовано для исследования тепловой работы методических печей Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского (ДМК) (Украина). Техническая характеристика методических печей трубозаготовочного стана ДМК дана в работе [6].

На первом этапе оценивали тепловое состояние стального блюма в процессе нагрева, при этом для корректировки основных параметров нагрева были использованы проведенные ранее экспериментальные исследования [6].

Результаты изменения температур в характерных точках сечения блюма размером 0,27 м при нагреве в методической печи трубозаготовочного стана ДМК, а также данные экспериментальных исследований приведены на рис. 1. Сравнение расчетных и опытных данных показывает их удовлетворительную сходимость. На втором этапе аналитический метод расчета теплового состояния использован для проведения серии расчетов с целью выбора рационального температурно-теплового режима. Внедрение разработанного режима нагрева блюмов в методической печи ТЗС позволило снизить удельный расход топлива на 5,7%.

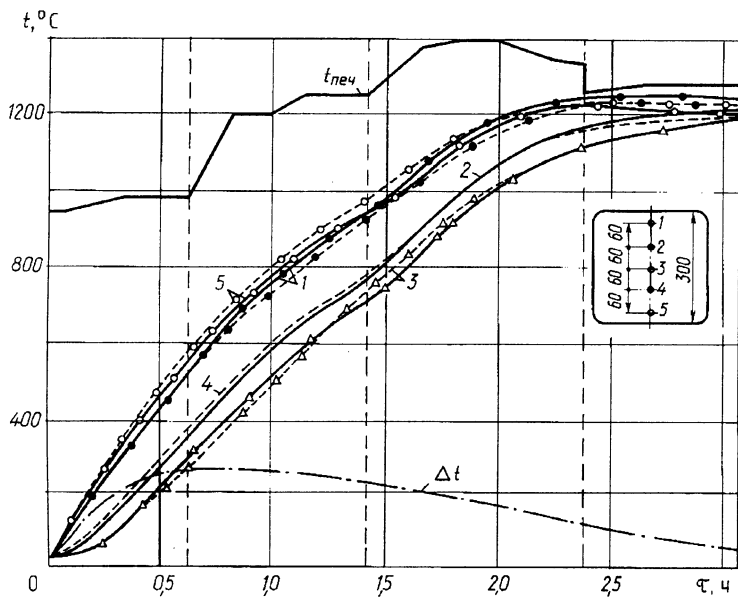


Рис. 3. Динамика температур по сечению бьюма размером $0,3 \times 0,3$ м: — — —, — — — соответственно расчетные и экспериментальные данные

Аналогичный комплексный подход предложено использовать при исследовании тепловой работы методической печи стана 600 Алчевского металлургического комбината (рис. 2). С целью уточнения параметров, входящих в расчетные выражения (5)—(14), предварительно осуществляли идентификацию приведенного аналитического метода на базе данных промышленного эксперимента при нагреве бьюма размером $0,3 \times 0,3$ м. Результаты идентификации представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что расхождение температур в характерных точках сечения бьюма имеет место в основном в области фазовых переходов ($750\text{—}800$ °С) и составляет порядка 4—5%.

Таким образом, данная методика может быть рекомендована для детального исследования теплотехнологических процессов с целью повышения производительности нагревательных устройств, совершенствования температурно-тепловых режимов и т. д.

Литература

1. Тимошпольский В. И., Гладилин Ю. И., Трусова И. А. и др. Тепловой и термомеханический расчет металлических изделий в многозонных печах // Изв. вузов. Энергетика. 1986. № 11.
2. Тимошпольский В. И., Мандель Н. Л., Севастьянов П. В. и др. Анализ сравнительной эффективности конечно-разностных методов решения нелинейных задач теории нагрева // Республ. межвед. сб.: Научные и прикладные проблемы энергетики. 1988. Вып. 15.
3. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И., Сичевой А. П. Анализ технологии нагрева металла в пламенных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 2.
4. Тимошпольский В. И., Трусова И. А. К расчету нагрева массивного металла в пламенных печах // Изв. вузов. Энергетика. 1985. № 1.
5. Тимошпольский В. И. Уточнение для расчетов методических печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1984. № 6.
6. Кавадзоров А. В., Самойлович Ю. А. О расчетах нагрева массивных тел излучением // Горение, теплообмен и процессы нагрева металла.: Сб. науч. тр. Свердловск: Металлургия. 1963. № 10.
7. Тимошпольский В. И. Разработка режимов нагрева стали в методических и кольцевых печах с использованием математических моделей // Сталь. 1999. № 7.