

НАГРЕВ ТЕЛ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОТИВОТОКА

Постольник Ю.С., *д.т.н., профессор*

Тимошпольский В.И.¹, *д.т.н., профессор, директор по науке
и новой технике (tree-89@mail.ru)*

Трусова И.А.², *д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургических
технологий (irinadnepr5@gmail.ru)*

¹ **ЗАО ПИН СИТ «Нефтегазстройизоляция»**
(04136, Украина, Киев, ул. Маршала Гречко, 14)

² **Белорусский национальный технический университет**
(220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, д. 65)

Аннотация. Приведен анализ известных и классических методов расчета нагрева термически массивных тел в теоретическом противотоке. В конкретном случае детальному анализу подверглись публикации Б.И. Китаева, Э.М. Гольдфарба, Г.П. Иванцова и Б.Я. Любова. Показано, что в литературе отсутствует надежный инженерный способ расчета термомассивных тел при нагреве одновременно излучением и конвекцией несмотря на то, что основной класс нагревательных печей в прокатном производстве работает по режиму противотока. Получено решение задачи нагрева термически массивных тел одновременно излучением и конвекцией с использованием противоточной схемы теплообмена. Решение поставленной задачи выполнено с использованием метода эквивалентных источников (МЭИ) в соответствии с моделью термического слоя для инерционного и упорядоченного (регулярного) этапов нагрева. Для оценки адекватности полученного решения осуществлено сравнение с классическим решением А.В. Кавадерова и В.И. Калугина, полученным для случая радиационного нагрева, которые показали удовлетворительное согласование расчетных данных для случая решения методом эквивалентных источников и с использованием гидростатического интегратора. Выполнены расчеты нагрева тел классической формы (пластины, цилиндра и шара). Предлагаемая методика может быть использована в теплотехнических расчетах режимов нагрева слитков и заготовок в металлургических печах для оценки температурного поля металла.

Ключевые слова: противоточный теплообмен, излучение и конвекция, нагрев термически массивных тел, инерционный и регулярный этапы, схема термического слоя, метод эквивалентных источников.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-740-745

Вопросы, связанные с исследованием нагрева материалов применительно к металлургической теплотехнике в противотоке, рассмотрены в многочисленных публикациях, причем некоторые из них носят классический характер ввиду глубокого понимания авторами самой сути «противотока» для различных металлургических переделов. Безусловно, особое место среди многочисленных фундаментальных публикаций занимают исследования уральской и днепропетровской научно-педагогических школ металлургической теплофизики и теплотехники [1 – 10 и др.]. Из приведенного в настоящей работе литературного обзора становится очевидным, что все они посвящены изучению, анализу и усовершенствованию, как правило, агломерационного и доменного процессов. При этом практически не акцентируется внимание на целесообразности исследования внутреннего теплообмена при тепловой обработке стальных заготовок в газопламенных печах прокатного производства. Между тем современные конструкции нагревательных и термических печей и протекающие

в них процессы обуславливают именно применение в ходе их расчетов (моделирования) теплообмена схемы противоточного нагрева.

На основании выполненного обзора можно отметить, что в современной научной литературе практически отсутствуют работы, касающиеся детального исследования внутреннего теплообмена при использовании в постановочном варианте классического описания противоточного нагрева стали. При этом более ранние публикации, например [9, 10], доказывают целесообразность развития приближенных аналитических методов расчета теоретического противотока при тепловой обработке стали в нагревательных печах.

В настоящей работе проведен детальный анализ существующих аналитических методов при решении технологических задач, где имеется возможность учета классического противотока, которые выделены в прилагаемом выше литературном обзоре. Установлено, что наиболее эффективен прием решения исходной задачи, приведенный в публикациях Э.М. Гольдфарба [6, 11],

где решение получено методом Фурье в виде искомым температурных функций, представленных бесконечными рядами. Следует отметить, что подобное решение приведено в известной работе [12].

Все перечисленные выше методы решения задач, за исключением [10], относятся к так называемому линейному классу и прежде всего за счет граничного условия, а значит, в меньшей степени соответствуют реальному процессу теплообмена, протекающему в печных агрегатах.

Между тем, еще в 1953 г. С.Е. Ростковский опубликовал работу [13], в которой акцентировал внимание на том, что, например, для различного конструктивного оформления методических печей, как правило, имеет место противоточное движение охлаждающихся продуктов сгорания и нагреваемого металла в условиях лучистого теплообмена.

В настоящей работе представлено решение нагрева термически массивных тел излучением и конвекцией с использованием противоточной схемы теплообмена. Такой случай в полной мере соответствует реальным условиям нагрева металла в методических печах [14 – 16].

Приведем исходную формулировку задачи:

$$\frac{1}{\rho^m} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho^m \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right|_{\rho=1} = \text{Sk} \left\{ \left[\theta_r^4(\tau) - \theta_n^4(\tau) \right] + \zeta \left[\theta_r(\tau) - \theta_n(\tau) \right] \right\}; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right|_{\rho=1} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{d\theta_r}{d\tau} = \text{Sk} \left\{ \left[\theta_r^4(\tau) - \theta_n^4(\tau) \right] + \zeta \left[\theta_r(\tau) - \theta_n(\tau) \right] \right\} n_m; \quad (4)$$

$$\theta(\rho, 0) = \theta' = \text{const}; \quad \theta_r(0) = \theta_n'' = 1; \quad (5)$$

здесь использованы следующие обозначения:

$$\theta(\rho, 0) = \frac{T(r, t)}{T_r''}; \quad \theta_r(\tau) = \frac{T_r(t)}{T_r''}; \quad \rho = \frac{r}{R};$$

$$\tau = \text{Fo} = \frac{at}{R^2}; \quad \text{Sk} = \frac{\sigma_b T_r^{n_3} R}{\lambda} \frac{n!}{r!(n-1)!}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha R}{\lambda};$$

$$\zeta = \frac{\text{Bi}}{\text{Sk}}; \quad n = \frac{VC}{V_r C_r}; \quad n_m = (1+m)n,$$

в которых m_0, n_0 – параметры, характеризующие функцию распределения температур по сечению заготовки; Bi и Sk – критериальные числа Био и Старка; $\theta_r(\tau)$ и $\theta_n(\tau)$ – соответственно безразмерные температуры газа и поверхности в момент времени τ ; n – отношение водяных чисел; m – коэффициент формы тела; $\theta(\rho, \tau)$ – безразмерная температура заготовки на расстоянии ρ от

центра заготовки в момент времени τ ; $\tau = \text{Fo}$ – критерий Фурье; ζ – отношение критериев Био и Старка; T и T_r – абсолютные температуры тела и газа; r – отсчитываемая от центра координата точки тела; $2R$ – толщина пластины, или диаметр цилиндра, шара; a – коэффициент температуропроводности; t – время; λ – теплопроводность металла; $V = FR/(1+m)$ – объем тела; F – его тепловоспринимающая поверхность; V_r – объем газа; T', T_r' и T'', T_r'' – соответствующие температуры тела и газа на входе и выходе; c_r – теплоемкость газа; σ_b и α – коэффициенты теплообмена излучением и конвекцией; использованы следующие индексы: ' – вход; '' – выход; 1 – инерционный этап; 2 – регулярный этап; п – поверхность; г – газ; * – окончание процесса нагрева; 0 – окончание инерционного этапа; в – видимый.

Установлено, что анализу и обобщению подобного класса нелинейных задач теории нагрева уделено незначительное внимание. И это, прежде всего, связано с тем, что последние два десятилетия лидирующее место в теории металлургических печей занимают численные методы с привлечением компьютерного моделирования, например [15, 16 и др.]. Обычно построение вполне определенной теории в металлургической теплотехнике всегда базировалось, прежде всего, на аналитических методах теории теплообмена и являлось основой для дальнейшего развития той или иной теории в металлургической теплотехнике, в формировании и развитии научного направления [3, 5, 6, 17 – 19 и др.].

По аналогии с работами [10, 14] решение исходной задачи (1) – (5) выполнено методом эквивалентных источников (МЭИ) для инерционного и упорядоченного (регулярного) этапов нагрева (модель термического слоя).

Для инерционного этапа ($0 \leq \tau \leq \tau_0$; $\beta(\tau) \leq \rho \leq 1$):

$$l(\tau) = \frac{2}{\text{Sk}} \left\{ \frac{\theta_{in}(\tau) - \theta'}{\left[\theta_{ir}^4(\tau) - \theta_{in}^4(\tau) \right] + \xi \left[\theta_{ir}(\tau) - \theta_{in}(\tau) \right]} \left[\frac{\rho - \beta(\tau)}{1 - \beta(\tau)} \right]^2 \right\}; \quad (6)$$

где $\beta(\tau) = 1 - l(\tau)$; здесь τ_0 – продолжительность инерционного этапа нагрева; $l(\tau)$ и $\beta(\tau)$ – глубина прогретого и непрогретого слоев.

Температура поверхности $\theta_{in}(\tau)$ или температурный перепад $\Delta\theta_1(\tau) = \theta_{in}(\tau) - \theta'$ определяются решением дифференциального уравнения

$$\frac{d}{d\tau} \left[\Delta\theta_1(\tau) l(\tau) \right] = \frac{6(1+m)\Delta\theta_1(\tau)}{l(\tau)}. \quad (7)$$

С использованием данных работы [14] получим

$$l(\tau) = \sqrt{6(1+m)\tau}, \quad (8)$$

и далее уравнение (7) принимает вид соотношения

$$\frac{d(l\Delta\theta_1)}{l\Delta\theta_1} = \frac{d\tau}{\tau},$$

интегрируя обе части которого, получим

$$\theta_1(\tau) = \sqrt{\frac{\tau}{6(1+m)}}; \theta_{1n}(\tau) = \theta' + \sqrt{\frac{\tau}{6(1+m)}}. \quad (9)$$

Используя выражения (6), исключив при этом $l(\tau)$ в уравнении (7), приходим к соотношению

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\Delta\theta_1^2(\tau)}{[\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)]} = \frac{3}{2}(1+m)Sk \{ [\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)] \}. \quad (10)$$

Из выражения (4) следует, что

$$Sk \{ [\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)] \} = \frac{1}{n_m} \frac{d\theta_r}{d\tau}. \quad (11)$$

Подставив последнее в правую часть соотношения (10), получим

$$\frac{d}{d\tau} \frac{\Delta\theta_1^2(\tau)}{[\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)]} = \frac{3}{2} \frac{Sk}{n} \frac{d\theta_{1r}}{d\tau}.$$

Интегрируя обе части последнего выражения с учетом уравнения (5), находим

$$\frac{\Delta\theta_1^2(\tau)}{[\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)]} = \frac{3}{2} \frac{Sk}{n} [\theta_{1r}(\tau) - 1]. \quad (12)$$

Используя систему уравнений (6), получим

$$[\theta_{1r}^4(\tau) - \theta_{1n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{1r}(\tau) - \theta_{1n}(\tau)] = \frac{2\theta_{1r}(\tau)}{Sk l(\tau)};$$

$$\theta_{1r}(\tau) = 1 + \frac{n}{3} \Delta\theta_1(\tau) l(\tau),$$

а при использовании (8), (9)

$$\theta_{1r}(\tau) = 1 + \frac{n\tau}{3}; \quad \tau \leq \tau_0 = \frac{1}{6(1+m)}. \quad (13)$$

К моменту окончания инерционного этапа ($\tau = \tau_0$, $l(\tau_0) = 1$) получим

$$\left. \begin{aligned} \theta_{1r}(\tau) &= 1 + \frac{n}{18(1+m)}; \quad \theta_{1r}(\tau_0) = \theta_{1r}^0; \\ \theta_1(\tau) &= \tau = \sqrt{\frac{\tau}{6(1+m)}}; \quad \Delta\theta_1^0 = \tau_0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Для регулярного этапа нагрева ($\tau_0 \leq \tau \leq \tau_*$; $0 \leq \rho \leq 1$) имеем

$$\frac{1}{\rho^m} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho^m \frac{\partial \theta_2}{\partial \rho} \right) = f_2(\tau). \quad (15)$$

В соответствии с работой [21] получим эквивалентный источник $f_2(\tau)$ в виде

$$f_2(\tau) = (1+m) \int_0^1 \rho^m \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} d\rho = (1+m) \frac{d}{d\tau} \int_0^1 \theta_2(\rho, \tau) \rho^m d\rho; \quad (16)$$

$$f_2(\tau) = (1+m)Sk \{ [\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)] \}. \quad (17)$$

Далее определим

$$\begin{aligned} \theta_2(\rho, \tau) &= \theta_{2n}(\tau) - Sk \times \\ &\times \{ [\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)] \} (1-\rho^2), \end{aligned} \quad (18)$$

откуда при $\rho = 0$ находим

$$\begin{aligned} \Delta\theta_2(\tau) &= \theta_{2n}(\tau) - \theta_{2n}(\tau) = \frac{Sk}{2} \times \\ &\times \{ [\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)] \}. \end{aligned} \quad (19)$$

Из условия теплового баланса (10) для упорядоченного этапа:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_2(\tau)}{n} + D &= \theta_{2n}(\tau) - \frac{Sk}{3+m} \times \\ &\times \{ [\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau)] + \xi[\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)] \} \end{aligned} \quad (20)$$

(здесь D – постоянная интегрирования) получим

$$\theta_{2r}(\tau) = \left[\theta_{2n}(\tau) - \frac{2}{3+m} \theta_2(\tau) - D \right] n. \quad (21)$$

Вычисляем

$$D = \theta' - \frac{1}{n} + \frac{2m}{3(3+m)} = (\theta_{1n}^0 - \theta'). \quad (22)$$

Далее в регулярном периоде нагрева устанавливаем взаимосвязь между основными параметрами $\theta_{2r}(\tau)$, $\theta_{2n}(\tau)$, $\theta_{2n}(\tau)$:

$$\begin{aligned} \theta_{2r}(\tau) &= 1 - \frac{2mn}{3(3+m)} \Delta\theta_1^2 + \frac{n}{3+m} \times \\ &\times \{ (1+m)[\theta_{2n}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)] + (3+m)[\theta_{2n}(\tau) - \theta'] \}. \end{aligned}$$

В дальнейшем, после несложных математических преобразований, получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{2r}}{[1 - k_2\theta_{2r}(\tau)]\theta_{2r}^3(\tau)} + \frac{4k_1Sk d\theta_{2r}}{(3+m)[1 - k_2\theta_{2r}(\tau)]} &= \\ &= 4(1+m)k_1Sk\theta_c d\tau; \end{aligned} \quad (23)$$

здесь

$$k_1 = 1 + \xi \left(\frac{\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau)}{\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau)} \right) \approx 1 + \frac{0,275 + 0,058m}{Sk},$$

$$k_2 = \frac{1-n}{\theta_c}. \quad [20]$$

Решение уравнения (23) получаем в виде

$$\Phi_r(\tau) - \Phi_r^0 = 4(1+m) \frac{k_1 Sk \theta_c}{k_2} (\tau - \tau_0); \quad (24)$$

здесь

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r(\tau) &= \ln \theta_{2r}(\tau) - p \ln [1 - k_2 \theta_{2r}(\tau)] - \frac{0,5 + \theta_{2r}(\tau)}{k_2^2 \theta_{2r}^2}; \\ \Phi_r^0 &= \Phi_r(\tau_0), \quad p = 1 + \frac{4k_1 Sk}{k_2^2 (3+m)}. \end{aligned} \right\} (25)$$

Используя выражение (20), приходим к уравнению

$$\theta_{2n}^2(\tau) + a_{1n} \theta_{2n}(\tau) = a_{0n}(\tau), \quad (26)$$

в котором $a_{1n} = \frac{3+m}{Sk} + \xi$;

$$a_{0n}(\tau) = \theta_{2r}^4(\tau) + \frac{3+m}{nSk} \left\{ \left[1 + \xi \left(\frac{nSk}{3+m} \right) \right] \theta_{2r}(\tau) - \theta_c \right\}.$$

Уравнение (26) имеет известное решение [21]:

$$\theta_{2n}(\tau) = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{2a_{1n}}{b_n} - b_n^2} - b_n \right), \quad (27)$$

где $b_n = \sqrt{U_n + V_n}; \frac{U_n}{V_n} = \sqrt[3]{\frac{a_{1n}^2}{2} \pm \sqrt{\Delta_n}}$;

$$\Delta_n = \left(\frac{4a_{0n}}{3} \right)^3 + \left(\frac{a_{1n}^2}{2} \right)^2.$$

Выражение для температуры оси (при $\rho = 0$) принимает вид

$$\theta_{2n}(\tau) = \theta_{2n}(\tau) - \frac{Sk}{2} \times \left\{ \left[\theta_{2r}^4(\tau) - \theta_{2n}^4(\tau) \right] + \xi \left[\theta_{2r}(\tau) - \theta_{2n}(\tau) \right] \right\}. \quad (28)$$

Среднемассовая температура тела определяется как

$$\bar{\theta}_2(\tau) = \frac{\theta_{2r}(\tau) - \theta_c}{n}. \quad (29)$$

Время τ_* окончания периода нагрева определяется по решению (24) в предположении, что $\theta_{2n}^* = \theta_{2n}(\tau_*) = \eta \theta_{2r}(\tau_*) = \eta \theta_{2r}^*$ (здесь η – показатель степени завершенности процесса).

Таким образом, подставляя значение $\theta_{2n}^* = \eta \theta_{2r}^*$ в уравнение (26), приходим к алгебраическому выраже-

нию, аналогичному (27), но относительно величины θ_{2r}^* . Соответственно коэффициенты a_{1r} и a_{0r} имеют вид

$$a_{1r} = \frac{3+m}{nSk} \frac{1-\eta n}{1-\eta^4} \left[1 + \xi \left(\frac{nSk}{3+m} \right) \frac{1-\eta}{1-\eta n} \right]; \quad a_{0r} = \frac{(3+m)\theta_c}{nSk(1-\eta^4)}.$$

После вычисления температуры θ_{2r}^* находим соответствующее ей значение τ_* :

$$\tau_* = \tau_0 + \frac{k_2^2}{4(1+m)k_1 Sk \theta_c} (\Phi_r^* - \Phi_r^0). \quad (30)$$

Таким образом, можно резюмировать: сформулированная нелинейная задача (1) – (5) нагрева термомассивных тел в противотоке решена полностью, что позволяет выполнить расчеты функций $\theta_r(\tau)$, $\theta_n(\tau)$, $\theta_c(\tau)$, $\bar{\theta}(\tau)$, $\Delta\theta(\tau)$ и время τ_* .

Здесь, очевидно, полагая $\xi = 0$, приходим к решению задачи исключительно радиационного нагрева в противотоке, но в обобщенной постановке. Однако, полагая $m = 0$ и принимая $\theta = 0,5$; $Sk = 0,5$; $n = 0,5$; $\eta = 0,99$, появляется реальная возможность сопоставить результаты исследований, полученные здесь и ранее авторами в работе [9].

Результаты сопоставительных расчетов представлены в графической форме на рис. 1. Очевидно, что при $\tau_0 = 0,166$ применение решения, приведенного в настоящей работе, практически полностью согласовывается с расчетными данными, полученными с применением гидростатического интегратора для пластины, что дает основание для использования решения (13), (14), (26) – (30) в практических расчетах промышленных печей, применяющих противоточный режим нагрева материалов.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты расчета нагрева излучением и конвекцией пластины

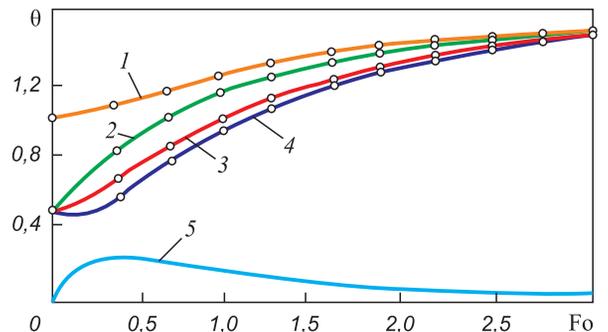


Рис. 1. Сопоставление результатов при нагреве пластины в противотоке:

— по МЭИ; —○— по методу Кавадерова–Калугина;
1 – 4 – температура дыма (печи), поверхности, среднемассовая, центра; 5 – перепад температур по сечению

Fig. 1. Comparison of the results of plate counterflow heating:
— according to ESM; —○— according to Kavaderov-Kalugin method;
1 – 4 – temperatures of smoke (of furnace), surface, bulk, center;
5 – cross-sectional temperature difference

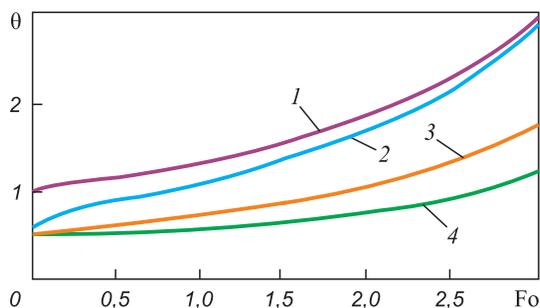


Рис. 2. Изменение температур при нагреве пластины в противотоке излучением и конвекцией одновременно при $\xi = 1,0$; $Sk = 0,5$; $n = 1,5$; 1 – 4 – температуры дыма (печи); поверхности; среднemasовая; центра

Fig. 2. Temperatures change at countercflow heating of a plate by radiation and convection simultaneously with $\xi = 1,0$; $Sk = 0,5$; $n = 1,5$; 1 – 4 – temperatures of smoke (of furnace); surface; bulk; center

ны при $\xi = 1,0$; $Sk = 0,5$; $n = 1,5$. Здесь очевидно, что процесс расходящийся, что, в сущности, характерно для чисел $n > 1$. В связи с этим для выполнения теплотехнических расчетов при нагревании термомассивных тел в теоретическом противотоке рекомендовано использование значений $n < 1$ и $\xi \leq 1,0$.

В дальнейшем выполнены расчеты по нагреву плиты, цилиндра и шара при исходных данных $\xi = 1,0$; $Sk = 0,5$; $n = 0,5$; $\theta = 0,5$; $\tau_* = Fo = 3,0$. Результаты вычислений, приведенные на рис. 3, показали, что все они соответствуют реальным теплофизическим процессам для тел классической геометрии [6].

Выводы. Выполнено решение задачи нагрева термомассивных тел классической формы в теоретическом противотоке при задании теплообмена излучением и конвекцией одновременно. Аналитическая часть решения поставленной задачи реализована с помощью метода эквивалентных источников для инерционного и упорядоченного периодов нагревания. Результаты выполненного тестового расчета для пластины практически полностью совпали с известным классическим решением исходной задачи Кавадерова–Калугина [9]. Представленные в работе результаты дают все основания для дальнейшего применения приведенных выражений в теплотехнических расчетах металлургических печей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах. – Свердловск-М.: Металлургиздат, 1945. – 152 с.
2. Китаев Б.И. Теплообмен в доменных печах. – Свердловск-М.: Металлургиздат, 1949. – 628 с.
3. Кавадеров А.В. Тепловая работа пламенных печей. – Свердловск: Металлургиздат, 1956. – 367 с.
4. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. – Свердловск-М.: Металлургиздат, 1957. – 280 с.
5. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 356 с.
6. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 439 с.

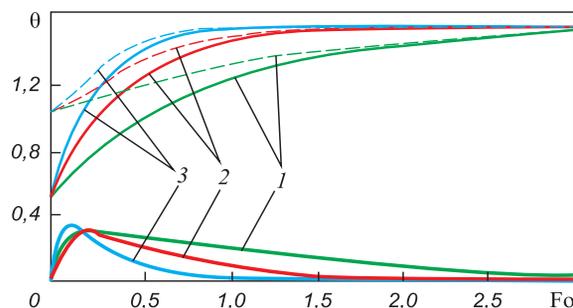


Рис. 3. Динамика температур при нагреве пластины (1), цилиндра (2) и шара (3) в противотоке излучением и конвекцией ($Sk = 0,5$; $\xi = 1,0$; $n = 0,5$; $Fo = \tau_* = 3,0$); штриховые линии – температура дыма (печи); нижние линии – температурный перепад

Fig. 3. Temperatures dynamics at countercflow heating of a plate (1), cylinder (2), sphere (3) by radiation and convection ($Sk = 0,5$; $\xi = 1,0$; $n = 0,5$; $Fo = \tau_* = 3,0$); dashed lines – temperature of smoke (of furnace); bottom lines – temperature drop

7. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
8. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
9. Кавадеров А.В., Калугин В.И. Закономерности нагрева массивного тела излучением в противотоке. – В кн.: Нагрев металла и работа нагревательных печей: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. № 6. С. 59 – 70.
10. Постольник Ю.С. К расчету температур и времени нагрева массивных тел при противоточном теплообмене // Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 6. С. 84 – 86.
11. Гольдфарб Э.М. Нагрев тел различной формы газами в прямотоке и противотоке // ЖТФ. 1954. Т. 24, № 6. С. 1012 – 1019.
12. Иванцов Г.П., Любов Б.Я. Прогрев кусковых материалов в условиях противотока // ДАН СССР. 1952. Т. 85, № 5. С. 993 – 995.
13. Ростовский С.Е. Передача тепла излучением при противотоке (к теории методических нагревательных печей) // Теплотехника слитка и печей: Тр. ЦНИИЧМ. – М.: Металлургиздат, 1953. Вып. 2 (5). С. 17 – 25.
14. Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Сичевой А.П. Анализ технологии нагрева металла в пламенных печах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 2. С. 110 – 113.
15. Нагрев стальных слябов // В.Н. Перетяшко, Н.В. Темлянец, М.В. Темлянец, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
16. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова и др.; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. – Минск: Бел. наука, 2001. – 879 с.
17. Металлургические печи / В.А. Баум, Д.В. Будрин, А.И. Ващенко и др. Под науч. ред. М.А. Глинкова. – М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1951. – 975 с.
18. Губинский В.И., Лу Чжун У. Теория пламенных печей. – М.: Машиностроение, 1995. – 255 с.
19. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учебник. В 2-х т. / В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Ольшанский и др.; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Бел. наука, 2007. Т. 1. – 596 с.; Т. 2. – 832 с.
20. Кавадеров А.В., Самойлович Ю.А. Закономерности нагрева пластины и цилиндра одновременно излучением и конвекцией // Нагрев металла и работа нагревательных печей: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. 1960. № 6. С. 44 – 58.
21. Тимошпольский В.И., Постольник Ю.С., Андрианов Д.Н. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии. – Минск: Бел. наука, 2005. – 560 с.

Поступила 7 мая 2016 г.

BLANK HEATING IN METALLURGICAL FURNACES BASED ON A THEORETICAL COUNTERFLOW MODEL

Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii¹, I.A. Trusova²

¹ CJSC PII SIT "NEFTEGAZSTROIHZOLYATSIYA", Kiev, Ukraine

² Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The analysis of certain well-known and classical methods for calculations of thermo-massive slab heating under conditions of theoretical counterflow is presented. In case at hand, publications by B.I. Kitaev, E.M. Goldfarb, G.P. Ivantsov, and B.Ya. Lubov have been analyzed in full details. It was demonstrated that literature lacks a reliable engineering method of calculation of heating thermo-massive semi-products with simultaneous exposure to thermal radiation and convection, even though the basic class of heating furnaces in the rolling industry are running in the counterflow mode. The authors have worked out a solution for the problem of thermally massive blank heating subject to simultaneous thermal radiation and convection, as well as using a counterflow heat exchange configuration. The stated problem has been solved using the method of equivalent sources (MES) in accordance with the thermal layer format, for two successive stages of heat exchange, namely: – inertial and orderly (regular). To estimate the level of adequacy of the result, the derived solutions have been compared with the classical ones by Kavalerov A.V. and Kalugin V.I. for the case of radiate heating. The results show a satisfactory fit of estimated data for the solution by the method of equivalent sources and with the use of a hydrostatic integrator. The calculations for blank heating have been made for semi-products of classical forms (plate, cylinder and sphere). The proposed technique can be used in heat-engineering calculations as applied to heating-up of ingots and billets in steel-making furnaces to estimate metal temperature fields.

Keywords: counterflow heat exchange, radiation and convection, heating of thermally massive blanks, inertial and regular stages, thermal layer scheme, method of equivalent sources.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-740-745

REFERENCES

- Kitaev B.I. *Teploobmen v shahtnykh pechah* [Heat exchange in shaft furnaces]. Sverdlovsk-Moscow: Metallurgizdat, 1945, 152 p. (In Russ.).
- Kitaev B.I. *Teploobmen v domennykh pechakh* [Heat exchange in blast furnaces]. Sverdlovsk-Moscow: Metallurgizdat, 1949, 628 p. (In Russ.).
- Kavaderov A.V. *Teplovaya rabota plamennykh pechei* [Thermal work of open-flame furnaces]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1956, 367 p. (In Russ.).
- Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Suchkov V.D. *Teploobmen v shakhtnykh pechakh* [Heat exchange in shaft furnaces]. Sverdlovsk-Moscow: Metallurgizdat, 1957, 280 p. (In Russ.).
- Kitaev B.I. *Teploobmen v domennoi pechi* [Heat exchange in blast furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 356 p. (In Russ.).
- Gol'dfarb E.M. *Teplotekhnika metallurgicheskikh protsessov* [Heat engineering in metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 439 p. (In Russ.).
- Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A., Malkin V.M., Shvydkii V.S., Shklyar F.R., Yaroshenko Yu.G. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat- and mass exchange in a dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.).
- Lislenko V.G., Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermal physics in metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 240 p. (In Russ.).
- Kavaderov A.V., Kalugin V.I. Peculiarities of solid body heating by radiation in a counterflow. In: *Nagrev metalla i rabota nagrevatel'nykh pechey: sb. nauch. tr. VNIIMT* [Heating of metal and work of heating furnaces: Coll. of scientific papers of VNIIMT]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1960, no. 6, pp. 59–70. (In Russ.).
- Postol'nik Yu.S. On the calculation of heating temperature and time of solid bodies at a counterflow heat exchange. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, no. 6, pp. 84–86. (In Russ.).
- Gol'dfarb E.M. Heating of bodies with different forms with gases in uniflow and counterflow. *ZhTF*. 1954, vol. 24, no. 6, pp. 1012–1019. (In Russ.).
- Ivantsov G.P., Lyubov B.Ya. Heating of lump materials in a conditions of a counterflow. *DAN SSSR*. 1952, vol. 85, no. 5, pp. 993–995. (In Russ.).
- Rostkovskii S.E. Heat transfer by radiation in counterflow (to the theory of methodical reheating furnaces). In: *Teplotekhnika slitka i pechei: Sb.tr. TsNIChM* [Heat engineering of ingot and furnaces]. Moscow: Metallurgizdat, 1953, vol. 2 (5), pp. 17–25. (In Russ.).
- Postol'nik Yu.S., Timoshpol'skii V.I., Sichevoi A.P. Analysis of metal heat technology in combustion furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979, no. 2, pp. 110–113. (In Russ.).
- Peretyat'ko V.N., Temlyantsev N.V., Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Nagrev stal'nykh slyabov* [Heating of steel slabs]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 192 p. (In Russ.).
- Timoshpol'skii V.I., Samoilovich Yu.A., Trusova I.A., Filippov V.V., Nesenchuk A.P. *Stal'noy slitok. V 3 t. T. 3. Nagrev* [Steel ingot. In 3 volumes. Vol. 3. Heating]. Timoshpol'skii V.I., Samoilovich Yu.A. eds. Minsk: Bel. nauka, 2001, 879 p. (In Russ.).
- Baum V.A., Budrin D.V., Vaschenko A.I., Glinkov M.A., Granovskii B.L., Kitaev B.I., Kuz'min M.A., Mikhailenko A.Ya., Nazarov I.S., Plotnikov L.A., Semikin I.D., Taits N.Yu., Troib S.G. *Metallurgicheskie pechi* [Metallurgical furnaces]. Glinkov M.A. ed. Moscow: GNTI literatury po cherno i tsvetnoi metallurgii, 1951, 975 p. (In Russ.).
- Gubinskii V.I., Lu Chzhun U. *Teoriya plamennykh pechei* [Theory of combustion furnace]. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 255 p. (In Russ.).
- Gubinskii V.I., Timoshpol'skii V.I., Ol'shanskii V.M., Mastrykov B.S., Nesenchuk A.P., Trusova I.A., Svinolobov N.P., Abramnikov Yu.Ya., Gres L.P., Mandel' N.L. *Metallurgicheskie pechi. Teoriya i raschet. Uchebnik. V 2 t.* [Metallurgical furnaces. Theory and calculations. Text-book in 2 vols.]. Timoshpol'skii V.I., Gubinskii V.I. eds. Minsk: Bel. nauka, 2007, vol. 1, 596 p; vol. 2, 832 p. (In Russ.).
- Kavaderov A.V., Samoilovich Yu.A. Heating peculiarities of a plate and cylinder simultaneously by radiation and convection. In: *Nagrev metalla i rabota nagrevatel'nykh pechei: Sb. nauch. tr. VNIIMT* [Heating of metal and work of heating furnaces: Coll. of scientific papers of VNIIMT]. Sverdlovsk, 1960, no. 6, pp. 44–58. (In Russ.).
- Timoshpol'skii V.I., Postol'nik Yu.S., Andrianov D.N. *Teoreticheskie osnovy teplofiziki i termomekhaniki v metallurgii* [Theoretical basis of thermal physics and thermal mechanics in metallurgy]. Minsk: Bel. nauka, 2005, 560 p. (In Russ.).

Information about the authors:

Postol'nik Yu.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor
Timoshpol'skii V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Science and New Equipment (tree-89@mail.ru)
Trusova I.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metallurgical Technologies (irinadnep5@gmail.ru)

Received May 7, 2016