

УДК 669.162.263

К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ШАХТНЫХ ПЕЧЕЙ С ПЛАВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ*

Швыдкий В.С., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (vshvit@isnet.ru)

Фатхутдинов А.Р., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (fathytdinov@mail.ru)

Девярых Е.А., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (evgeny.9h@gmail.com)

Девярых Т.О., аспирант кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (shumina_t@mail.ru)

Спиринов Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика
в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. Сформулирована задача стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых побудительной причиной движения обрабатываемых материалов является их плавление. Здесь проявляется та особенность процессов переноса энергии, что их интенсивность в значительной степени определяется скоростью движения материала, которая в свою очередь существенно зависит от темпа плавления частиц. Поскольку единственным способом примирения указанного противоречия является итерационный подход, то в целом при математической формулировке задачи приходится прибегать к идеализации отдельных явлений. В частности, отдельные идеализации являются вынужденными в силу недостаточной теоретической проработки ряда вопросов, например, математической теории движения сыпучих материалов в шахтных печах. При описании газомеханики слоя в работе используется приближение безвихревого течения.

Ключевые слова: слоевой процесс, теплообмен, плавление, безвихревое течение, математическое описание.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-424-430

В последнее время работы по математическому моделированию металлургических агрегатов развиваются весьма интенсивно. Однако вопрос о надежных методах оптимизации их конструктивных и режимных параметров, в особенности шахтных слоевых печей, все еще остается актуальным, поскольку имеющиеся математические модели газодинамики и теплообмена не учитывают механизма движения слоя материала, подвергающегося тепловой обработке. В каждой конкретной шахтной печи источники движения материала специфичны, однако имеется класс агрегатов, в которых побудительной причиной движения является плавление шихты. В этом случае скорость движения (опускания) материалов сама является суммарным результатом развития теплофизических процессов, что должно найти отражение в математической модели шахтной печи [1 – 3].

Рассмотрим эту проблему на примере шахтной печи для расплавления медных пластин, полученных из цеха

электролиза. Физическая постановка задачи заключается в следующем (рис. 1). В шахтную печь высотой H и характерным средним радиусом R через дискретно расположенные газораспределительные устройства диаметром d_{ϕ} (в дальнейшем называемые фурмами) вдувается газ (продукты сгорания топлива) в количестве Q_v , м³/с, с температурой T_0 , °С. Для создания необходимой высоты зоны плавления газораспределительные устройства размещаются на трех горизонтах, причем расстояние от «днища» печи до плоскостей осей фурм составляет $H_{1\phi}$, $H_{2\phi}$, $H_{3\phi}$, м. Сверху в печь загружают шихтовые материалы, эквивалентный диаметр частиц которых d_{m0} , м, температура t_0 , °С, а объемный расход Q_m , м³/с. В процессе передачи теплоты от газов к материалу происходит его нагрев, плавление и перемещение. Требуется найти распределение температур и скоростей материала и газов в объеме печи.

Хотя горячий газ вводится в рабочее пространство печи дискретно, будем считать движение теплоносителей осесимметричным. Основанием для такого упрощения является то обстоятельство, что для рассмат-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006.

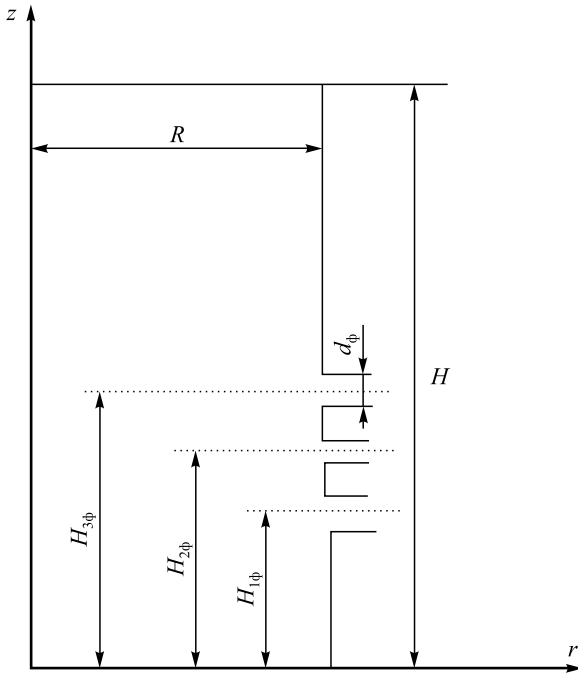


Рис. 1. Принципиальная схема газовой шахтной печи

Fig. 1. Principle scheme of the gas shaft furnace

риваемой конструкции печи расстояние между осями фурм по окружности наружной поверхности не превышает 0,54 м, а при этих условиях уже на расстоянии R от плоскости фурм течение газов становится практически двумерным [3].

Математическая формулировка поставленной задачи в предположении о безвихревом установившемся характере движения газов и материалов включает следующие уравнения.

Уравнение баланса массы газов (уравнение неразрывности) имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varepsilon \rho_r r w_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon \rho_r r w_{rz}) = 0, \quad (1)$$

где r и z – радиальная и аксиальная координаты, м; w_{rr} и w_{rz} – радиальная и аксиальная компоненты скорости газа, м/с; ε – порозность слоя; ρ_r – плотность газа, кг/м³.

Вводя функцию тока $\psi(r, z)$, имеющую смысл массового расхода газа, соотношениями

$$w_{rr} = \frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w_{rz} = -\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (2)$$

и используя условие отсутствия завихренности $\frac{\partial w_{rr}}{\partial z} - \frac{\partial w_{rz}}{\partial r} = 0$ [4 – 8], получаем определяющее уравнение для функции тока

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon \rho_r r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение теплового баланса (энергии), объединенное с уравнением неразрывности, запишется так:

$$c_r \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(T \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] = -\alpha_v r (T - t_{\text{мас}}) - r L \rho_m (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau}, \quad (4)$$

где c_r – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); T – температура газа, °С; $t_{\text{мас}}$ – среднemasовая температура материала, °С; L – удельная теплота плавления материала, Дж/кг; α_v – объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·К); $\gamma = \frac{d_{m0}^3 - d_m^3}{d_{m0}^3}$ – степень расплавления

куска шихты, доли; ρ_m – плотность материала «куска» шихты, кг/м³; τ – время, с.

Соответствующие схеме рис. 1 граничные условия уравнения (3) имеют следующий вид:

$$\psi = \begin{cases} \rho_r Q_v & \text{при } r = 0 \text{ и } 0 \leq z < H; \\ \rho_r Q_v & \text{при } 0 \leq r \leq R \text{ и } z = 0; \\ \rho_r Q_v & \text{при } r = R \text{ и } 0 \leq z < H_{1\phi}; \\ \rho_r Q_v - \frac{\rho_r Q_{1v}}{d_\phi} \left(z - H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{1\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z < H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_v - \rho_r Q_{1v} & \text{при } r = R \\ \text{и } H_{1\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z < H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_v - \rho_r Q_{1v} - \frac{\rho_r Q_{2v}}{d_\phi} \left(z - H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{2\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z < H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_v - \rho_r Q_{1v} - \rho_r Q_{2v} & \text{при } r = R \\ \text{и } H_{2\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z < H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2}; \\ \rho_r Q_v - \rho_r Q_{1v} - \rho_r Q_{2v} - \frac{\rho_r Q_{3v}}{d_\phi} \left(z - H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \right) & \text{при } r = R \text{ и } H_{3\phi} - \frac{d_\phi}{2} \leq z < H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2}; \\ 0 & \text{при } r = R \text{ и } H_{3\phi} + \frac{d_\phi}{2} \leq z < H; \end{cases} \quad (5)$$

здесь $Q_{1v} + Q_{2v} + Q_{3v} = Q_v$.

Заметим, что соотношение

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = H \text{ и } 0 \leq r < R \quad (6)$$

эквивалентно утверждению об одномерном характере движения газов на выходе из слоя.

Для температуры газа на оси печи ($r = 0$) имеем условие симметричности температурного поля:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (7)$$

На стенках печи (кроме фурм) задаются потери теплоты конвекцией и теплопроводностью в окружающую среду при $r = R$:

$$-\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} = k(T - T_{\text{окр}}), \quad k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_i \frac{S_i}{\lambda_{mi}} + \frac{1}{\alpha_2} \right); \quad (8)$$

здесь k – коэффициент теплопередачи от газа в окружающую среду, Вт/(м²·К); α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности, Вт/(м²·К); S_i – толщина i -го огнеупорного слоя кладки, м; λ_{mi} и λ_r – коэффициенты теплопроводности i -го огнеупорного слоя и газа у внутренней стенки, Вт/(м·К).

Поскольку печи данного типа не имеют копильника, то в качестве граничного условия для «днища» печи можно принять условие отсутствия тепловых потерь:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = 0 \text{ и } 0 \leq r < R. \quad (9)$$

На уровне засыпи, а также у стенки печи движение газа одномерное, поэтому уравнение теплового баланса упрощается до соотношения

$$c_r \rho_r \varepsilon w_{rz} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_v (t_{\text{мас}} - T) \quad \text{при } z = H, \quad (10)$$

причем здесь $t_{\text{мас}} = t_0 = \text{const}$.

Тогда уравнение (10) превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка, имеющее решение

$$T(z) = t_0 + A \exp \left(- \frac{\alpha_v z}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}} \right), \quad (11)$$

где A – постоянная интегрирования.

При $r = R$ и $z = H_{1\phi}$ имеем $T = T_0$, следовательно,

$$A = (T_0 - t_0) \exp \left(\frac{\alpha_v H_{1\phi}}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}} \right);$$

$$T = t_0 + (T_0 - t_0) \exp \left[- \frac{\alpha_v (H - H_{1\phi})}{c_r \rho_r \varepsilon w_{rz}} \right] \quad (12)$$

при $z = H$ и $0 \leq r \leq R$.

При анализе закономерностей движения и нагрева материала вполне допустимо предположение об их одномерности («поршневой» характер движения). В самом деле, получаемые из цеха электролиза пластины имеют

размер 800×900×10 мм, в то время как радиус печи составляет 2412 мм при ее высоте 9205 мм. Конечно, и в процессе загрузки в печь, и в процессе движения внутри печи пластины могут (и будут) деформироваться и изменять форму, однако в любом случае горизонтальные перемещения материала маловероятны. В этих условиях уравнение баланса массы материала можно записать так:

$$\rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz} S = \text{const} \quad \text{при } z > z_{\text{пл}};$$

$$\frac{\partial}{\partial z} [\rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz}] = \rho_m (1 - \varepsilon) \frac{d\gamma}{d\tau} \quad \text{при } 0 < z \leq z_{\text{пл}}, \quad (13)$$

где S – площадь поперечного сечения шахты, м²; w_{mz} – скорость опускания материала, м/с; $z_{\text{пл}}$ – горизонт плавления материала, м.

При одномерном движении уравнение теплообмена (нагрева материала) имеет вид

$$c_m \rho_m (1 - \varepsilon) w_{mz} \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_v (t_{\text{мас}} - T), \quad (14)$$

где c_m – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Фигурирующая в уравнениях скорость движения материала w_{mz} целиком определяется динамикой его плавления. В плане описания плавления материала отметим следующее. Теплофизические свойства расплава и твердой шихты в области температуры плавления различаются крайне незначительно, поэтому представляется допустимым в целях упрощения модели пренебречь учетом закономерностей стекания (растекания) расплава по твердому остатку «куска» шихты. Такое упрощение эквивалентно допущению о мгновенном удалении расплава, что характерно для задач абляции [9]. Тогда уравнения блока математической модели шахтной печи, связанного с процессом плавления материала, сводятся к уравнению теплопроводности с соответствующими краевыми условиями:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial t}{\partial \tau_1} = \frac{1}{x^{v-1}} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{v-1} \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad \tau_1 > 0, \quad 0 < x < \delta(\tau_1); \quad (15)$$

$$\tau_1 = 0, \quad \delta(0) = \frac{d_{m0}}{2}, \quad t(x, 0) = t_k(x); \quad (16)$$

$$t(\delta, \tau_1) = t_{\text{пл}}; \quad (17)$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial x} = 0; \quad (18)$$

$$x = \delta(\tau_1), \quad \lambda_m \frac{\partial t(\delta, \tau_1)}{\partial x} - \rho_m L \frac{\partial \delta}{\partial \tau_1} = \alpha_F (T - t_{\text{пл}}), \quad (19)$$

где $a = \frac{\lambda_m}{c_m \rho_m}$ – коэффициент температуропроводности куска, м²/с; x – координата изменения температуры куска, м; δ – радиус нерасплавленной части куска, м; $t_{\text{пл}}$ – температура плавления материала куска, °С; t_k – значение локальной температуры куска перед нача-

лом плавления, °С; α_F – коэффициент теплоотдачи на единицу поверхности куска, Вт/(м²·К); ν – коэффициент формы куска.

Совокупность уравнений (1) – (19), представленная (в различных сочетаниях) в конечно-разностном виде, и составляет математическую инженерную модель шахтной печи для плавки черновой меди. В то же время нельзя не отметить узкие места в реализации этой модели, связанные, в основном, со свойствами слоя и, в первую очередь, с его порозностью. Поскольку расчет движения материала в настоящее время невозможен и приходится принимать допущение о его поршневом характере, то и поле порозности можно только задавать либо на основе эксперимента, либо исходя из других соображений.

В литературе [10 – 15], а также проведенными исследованиями (см. например [14]) показано, что в инженерных приложениях для построения дискретных аналогов уравнений математической модели наиболее удобными являются метод конечных элементов и метод контрольного объема (интегро-интерполяционный метод). Поскольку последний метод очень подробно изложен в работах [14, 15], то в целях экономии места промежуточные преобразования опустим и сразу приведем окончательные алгебраические уравнения.

Для уравнения (3), определяющего поле функций тока, итоговое уравнение метода контрольного объема (МКО) с учетом граничных условий (5), (6), получаем

$$A_P \Psi_P = A_E \Psi_E + A_W \Psi_W + A_N \Psi_N + A_S \Psi_S, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} A_E &= \frac{4}{(r_E + r_P)[(\varepsilon_P)_E + (\varepsilon_P)_P]} \frac{\Delta z}{(\delta r)_e}; \\ A_W &= \frac{4}{(r_W + r_P)[(\varepsilon_P)_W + (\varepsilon_P)_P]} \frac{\Delta z}{(\delta r)_w}; \\ A_N &= \frac{2}{r_P[(\varepsilon_P)_N + (\varepsilon_P)_P]} \frac{\Delta r}{(\delta z)_n}; \\ A_S &= \frac{2}{r_P[(\varepsilon_P)_S + (\varepsilon_P)_P]} \frac{\Delta r}{(\delta z)_s}; \\ A_P &= A_E + A_W + A_N + A_S. \end{aligned}$$

В изотермической задаче все параметры среды в этих коэффициентах постоянны [7].

Точно так же, как и в случае функции тока, проинтегрируем уравнение энергии газа (уравнение теплового баланса) по контрольному объему и с учетом граничных условий (7) – (10) с использованием схемы «против потока» получаем дискретный аналог уравнения энергии газа:

$$\begin{aligned} B_E(T_P - T_E) + B_W(T_P - T_W) + B_N(T_P - T_N) + \\ + B_S(T_P - T_S) + \alpha_{V,P}(T_P - t_{\text{mac},P})r_P\Delta r\Delta z + \\ + L_P\rho_{M,P}(1 - \varepsilon_P)\left(\frac{d\gamma}{d\tau}\right)_P r_P\Delta r\Delta z = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Преобразуем уравнение (21) к канонической форме:

$$A_P T_P = A'_E T_E + A'_W T_W + A'_N T_N + A'_S T_S + S_T, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} A'_E &\equiv B_E, \quad A'_W \equiv B_W, \quad A'_N \equiv B_N, \quad A'_S \equiv B_S, \\ S_T &\equiv \alpha_{V,P}t_{\text{mac},P}r_P\Delta r\Delta z - L_P\rho_{M,P}(1 - \varepsilon_P)\left(\frac{d\gamma}{d\tau}\right)_P r_P\Delta r\Delta z, \\ A'_P &\equiv A'_E + A'_W + A'_N + A'_S + \alpha_{V,P}r_P\Delta r\Delta z. \end{aligned} \quad (23)$$

В выражениях (23) подробная запись коэффициентов B имеет вид

$$\begin{aligned} B_E &= \frac{C_{V,P}}{8} [(\Psi_{SE} + \Psi_S - \Psi_{NE} - \Psi_N) + \\ &+ |\Psi_{SE} + \Psi_S - \Psi_{NE} - \Psi_N|]; \\ B_W &= \frac{C_{V,P}}{8} [(\Psi_{NW} + \Psi_N - \Psi_{SW} - \Psi_S) + \\ &+ |\Psi_{NW} + \Psi_N - \Psi_{SW} - \Psi_S|]; \\ B_N &= \frac{C_{V,P}}{8} [(\Psi_{NE} + \Psi_E - \Psi_{NW} - \Psi_W) + \\ &+ |\Psi_{NE} + \Psi_E - \Psi_{NW} - \Psi_W|]; \\ B_S &= \frac{C_{V,P}}{8} [(\Psi_{SW} + \Psi_W - \Psi_{SE} - \Psi_E) + \\ &+ |\Psi_{SW} + \Psi_W - \Psi_{SE} - \Psi_E|]. \end{aligned}$$

При одномерном движении материала дискретный аналог уравнения теплообмена запишется в виде

$$\frac{t_{\text{mac},n} - t_{\text{mac},s}}{\Delta z} = \left(\frac{\alpha_V}{c_M \rho_M (1 - \varepsilon) w_{Mz}} \right)_P (t_{\text{mac},P} - T_P)$$

или в канонической форме

$$t_{\text{mac},P} = T_P + \frac{t_{\text{mac},N} - t_{\text{mac},S}}{N_P}; \quad (24)$$

здесь $N_P = 2 \left(\frac{\alpha_V}{c_M \rho_M (1 - \varepsilon) w_{Mz}} \right)_P \Delta z$.

На первом этапе исследований скорость движения материала v_{Mz} можно задавать по производительности печи.

Ниже в качестве иллюстрации использования вышеприведенных уравнений показаны картины изменения функции тока, скоростей и температур в печи (рис. 1.) На рис. 2, а представлено распределение функции тока для изотермической задачи, а на рис. 2, б для неізотермической. Здесь горизонтальная координата изменяется от нуля до 1,2 м, вертикальная также от нуля до 11,25 м; диаметр фурм составляет 40 мм, а расходы природного газа на горизонтах ввода распределены следующим образом: $Q_1 = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($z_1 = 2,1 \text{ м}$), $Q_2 = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$

($z_2 = 2,6$ м) и $Q_3 = 300$ м³/ч ($z_3 = 3,1$ м). Заметим, что это поле ψ (рис. 2, а) используется в качестве начального приближения для последующих расчетов.

На рис. 3 показаны поля скорости газа и температур для случая, когда скорость материала задавалась по

производительности (плавление частиц не рассчитывалось). Можно видеть, что в физическом плане полученные закономерности вполне адекватны. Однако принятые упрощения, конечно, исказили температурное поле материала, чрезмерно выровняв его.

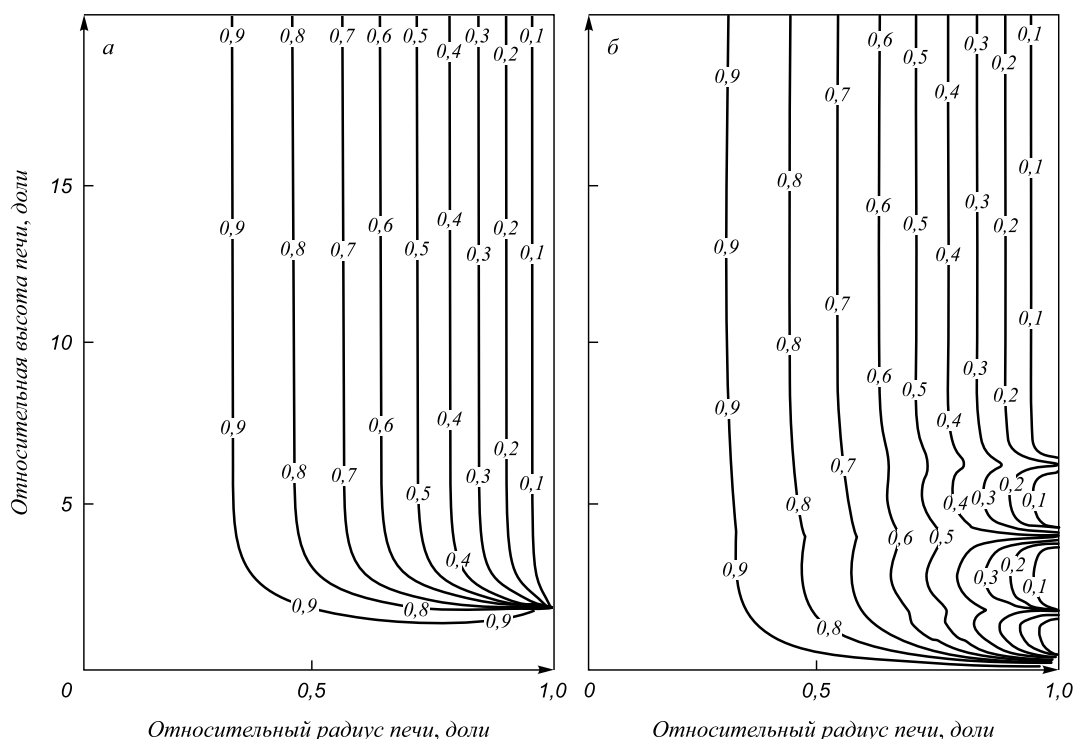


Рис. 2. Картина течения в шахтной печи в изотермических (а) и неизотермических (б) условиях

Fig. 2. Flow pattern of the shaft furnace in isothermal (a) and unisothermal (б) conditions

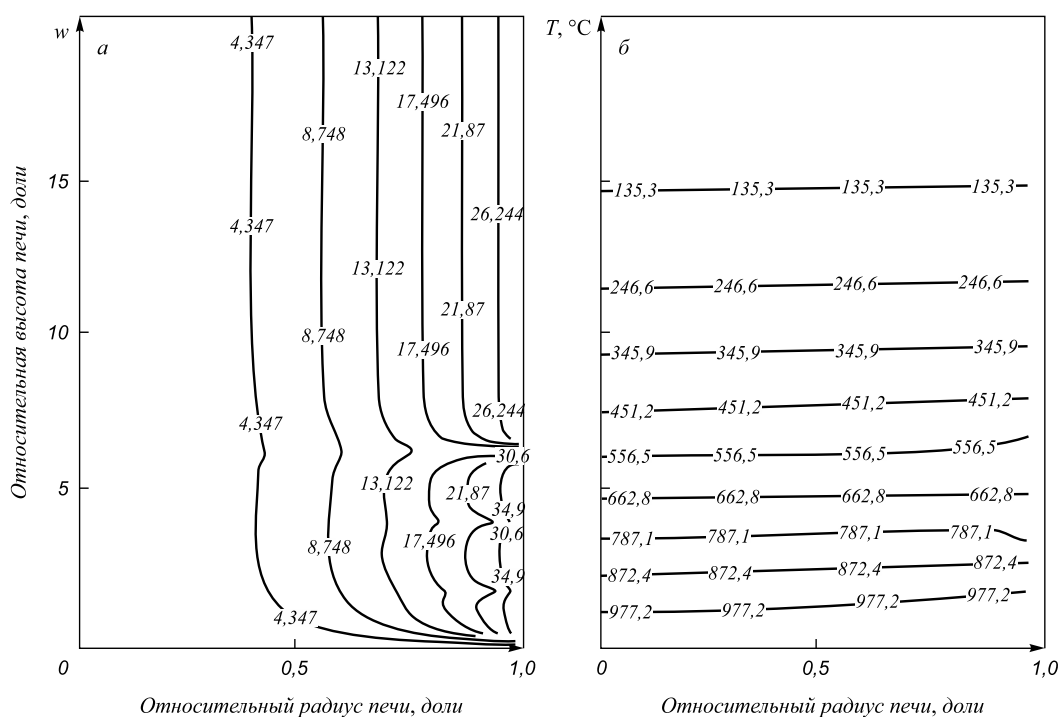


Рис. 3. Поля скорости газа (а) и температуры материала (б) в шахтной печи

Fig. 3. Fields of gas speed (a) and material temperature (б) in the shaft furnace

Выводы. Анализ результатов расчетов показывает, что разработанная математическая модель шахтной слоевой печи с плавлением материала, в целом, правильно отображает изменение теплофизических параметров работы и может использоваться для оптимизации режимов работы печи. Необходимо только улучшить работу программы для случаев неизотермического движения потоков газа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Китаев Б.И., Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А. Тепло- и массообмен в плотном слое. – М.: Metallurgiya, 1972. – 432 с.
2. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Metallurgiya, 1978. – 218 с.
3. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я.М. Гордон, Б.А. Боковиков, В.С. Швыдкий и др. – М.: Metallurgiya, 1989. – 121 с.
4. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепло-массопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Лодыгичев и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 1999. – 520 с.
5. Гордон Я.М., Максимов Е.В., Швыдкий В.С. Механика движения газов и материалов в шахтных печах. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 144 с.
6. Швыдкий В.С., Лодыгичев М.Г., Шаврин В.С. Математические методы теплофизики: Учебник для вузов. – М.: Теплотехник, 2005. – 232 с.
7. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. – Кемерово; М.: Издательское объединение "Российские университеты": Кузбассвузиздат – АСТИП, 2006. – 431 с.
8. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учеб. пособие для вузов. – М.: Metallurgiya, 1990. – 239 с.
9. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1975. – 208 с.
10. Турчак Л.И., Плотноков П.В. Основы численных методов: Учебник для вузов. – М.: Физматлит, 2003. – 304 с.
11. Волков Е.А. Численные методы: Учебник для вузов. – М.: Лань, 2004. – 256 с.
12. Самарский А.А. Введение в численные методы. 5-е изд., стереотипное: Учебник для вузов. – М.: Лань, 2009. – 288 с.
13. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. 3-е изд., стереотипное. – М.: Высшая школа, 2009. – 848 с.
14. Швыдкий В.С., Дзюзер В.Я. Методы численного решения инженерных задач: Учебн. пособие. – Екатеринбург: Из-во АМБ, 2010. – 400 с.
15. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Поступила 4 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 6, pp. 424–430.

MATHEMATICAL DESIGN OF THE SHAFT FURNACES WITH MATERIALS MELTING

V.S. Shvydkii, A.R. Fatkhutdinov, E.A. Devyatykh, T.O. Devyatykh, N.A. Spirin

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin Ekaterinburg, Russia

Abstract. The authors have formed the objective of stationary heat exchange in shaft grate-fired furnaces in which the reason of processed materials movement is their melting. In this case the energy transfer specific feature manifests itself, namely the process intensity is largely determined by the speed of material flow, which in turn, substantially depends on particles melting tempo. Since iterative approach is the only way for reconciliation of the contradictions, in mathematical formulation of the tasks in general it is necessary to rely on idealization of certain phenomena. In particular, certain idealizations are necessary due to insufficient number of theoretical explanations of certain issues, i.e., mathematical theory of solid materials movement in the shaft furnaces. The vortex-free flow was used at description of layer gas mechanics.

Keywords: layered process, heat, melting, vortex-free flow, mathematical description.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-424-430

REFERENCES

1. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass exchange in dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 432 p. (In Russ.).
2. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domennogo protsessa* [Thermal technology of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 218 p. (In Russ.).
3. Gordon Ya.M., Bokovikov B.A., Shvydkii V.S. etc. *Teplovaya rabota shakhtnykh pechei i agregatov s plotnym sloem* [Thermal work of shaft furnaces and units with dense layer]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 121 p. (In Russ.).
4. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lodygichev M.G. etc. *Elementy teorii sistem i chislennye metody modelirovaniya protsessov teplomassopere-nosa* [Elements of system theory and digital methods of thermal an mass transfer modeling]. Moscow: Internet Inzhiniring, 1999, 520 p. (In Russ.).
5. Gordon Ya.M., Maksimov E.V., Shvydkii V.S. *Mekhanika dvizheniya gazov i materialov v shakhtnykh pechakh* [Mechanics of gas and materials flow in shaft furnaces]. Alma-Ata: Nauka, 1989, 144 p. (In Russ.).
6. Shvydkii V.S., Ladygichev M.G., Shavrin V.S. *Matematicheskie metody teplofiziki: Uchebnik dlya vuzov* [Mathematic methods in thermal physics: Textbook for universities]. Moscow: Teplotekhnika, 2005, 232 p. (In Russ.).
7. Tsybmal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh sistem v metallurgii* [Mathematic modeling of complex systems in metallurgy]. Kemerovo, Moscow: Izdatel'skoe ob'edinenie "Rossiiskie universitety": Kuzbassvuzizdat, ASTIII, 2006, 431 p. (In Russ.).
8. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoi raboty promyshlennykh pechei: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Mathematic modeling of thermal work of industrial furnaces: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 239 p. (In Russ.).
9. Biot Maurice A. *Variational principles in heat transfer: a unified Lagrangian analysis of dissipative phenomena*. Oxford: Clarendon Press, 1970. (Russ.ed.: Biot M. *Variatsionnye printsipy v teorii teploobmena*. Moscow: Energiya, 1975, 208 p.).
10. Turchak L.I., Plotnikov P.V. *Osnovy chislennykh metodov: Uchebnik dlya vuzov* [Basics of numerical methods: Textbook for universities]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 304 p. (In Russ.).

11. Volkov E.A. *Chislennye metody: Uchebnik dlya vuzov* [Numerical methods: Textbook for universities]. Moscow: Lan', 2004, 256 p. (In Russ.).
12. Samarskii A.A. *Vvedenie v chislennye metody: Uchebnik dlya vuzov* [Introduction in numerical methods: Textbook for universities] Moscow: Lan', 2009, 288 p. (In Russ.).
13. Verzhbitskii V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Basics of numerical methods, 3rd edition]. Moscow: Vysshaya shkola, 2009, 848 p. (In Russ.).
14. Shvydkii V.S., Dzyuzer V.Ya. *Metody chislennogo resheniya inzhenernykh zadach: Uchebn. posobie* [Methods of numerical solving of engineering tasks: Manual]. Ekaterinburg: Iz-vo AMB, 2010, 400 p. (In Russ.).
15. Patankar Suhas V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. (Russ.ed.: Patankar S. *Chislennye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 152 p.).

Acknowledgements. The work was supported by the Government of the Russian Federation, act no. 211, contract no. 02.A03.21.0006.

Information about the authors:

V.S. Shvydkii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (vshvit@isnet.ru)

A.R. Fatkhutdinov, Postgraduate of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (fathytdinov@mail.ru)

E.A. Devyatykh, Postgraduate of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (evgeny.9h@gmail.com)

T.O. Devyatykh, Postgraduate of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (shumina_t@mail.ru)

N.A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (n.a.spirin@urfu.ru)

Received 4 February, 2016