УДК 669.053.75

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОБЖИГА РУДОУГОЛЬНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЕ

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

Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)

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

Лавров В.В., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)

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

Аннотация. Рассмотрена инженерная математическая модель развития физико-химических превращений в объеме окатыша, состоящего из гранул железной руды, известняка и кокса (углеродсодержащего топлива). Показано, что адекватные экспериментальным данным являются математические модели, использующие трехступенчатую схему восстановления. Строгое математическое описание процесса восстановления по этой схеме требует совместного решения задач кинетики последовательно-параллельных реакций и диффузии многокомпонентного газа в порах куска руды. Такой подход не может быть использован в математической модели процесса обжига рудоугольных окатышей вследствие своей сложности. Эта сложность еще более возрастает при учете характерной особенности газового и температурного режимов обжиговой машины, производящей офлюсованные рудоугольные окатыши: изменение состава газа по ходу материала (переход от окислительной атмосферы к восстановительной или нейтральной). Для решения задачи восстановления рудной гранулы важно знать кривые распределения концентраций восстановителей и газообразных продуктов реакции по радиусу. В силу сложности уравнений диффузии, прогрева гранул и химической кинетики используется приближенный метод решения задачи Стефана, развитый Л.С. Лейбензоном, сущность которого состоит в предположении, что в каждый момент времени для заданной концентрации компонента газа в макропорах окатыша в объеме гранулы успевает установиться квазистационарное распределение. Все реакции восстановления оксидов протекают не на поверхности микропор соответствующего слоя гранулы, а на разделяющих эти слои фронтальных поверхностях, причем восстановление центрального объема первоначального магнетита не получает развития до тех пор, пока соседняя гематитовая область не восстановится до Fe_3O_4 . При таких условиях вся сложность упрощенной математической модели компенсируется надлежащим выбором алгоритма численного решения системы уравнений. Поскольку ряд упрощений не соответствует реальности (например, слой металлического железа не пропускает газ-восстановитель), приходится использовать эффективные коэффициенты, значение которых устанавливается в процессе адаптации модели.

Ключевые слова: физико-химические превращения, окатыш, гранулы, слои рудной гранулы, квазистационарность, задача Стефана, поверхность пор, фронтальная поверхность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-288-293

Задача проектирования обжиговых машин и оптимизации их тепловой работы не может быть эффективно решена до тех пор, пока в математической модели процесса не будут относительно точно определяться интенсивности протекания отдельных химических реакций. Учитывая сделанные в работе [1] замечания об общей сложности комплексной математической модели процесса обжига рудоугольных окатышей, описание физико-химических аспектов процесса желательно оформлять в виде относительно простых математических уравнений, отражающих тем не менее правильно основные (характерные) стороны того или иного явления.

Наибольший интерес и, в то же самое время, самые большие затруднения вызывает описание процесса вос-

становления оксидов железа рудных гранул окатыша. Как показывает обзор литературы [2 – 14], адекватными экспериментальным данным являются математические модели, использующие трехступенчатую схему восстановления. Строгое математическое описание процесса восстановления по такой схеме требует совместного решения задач кинетики последовательно-параллельных реакций и диффузии многокомпонентного газа в порах куска руды (окатыша). Наиболее последовательно такой метод анализа закономерностей восстановления проведен в работе [8], однако он не может быть использован в математической модели процесса обжига рудоугольных окатышей вследствие своей сложности, и его необходимо упростить до разумного предела.

Рис. 1. Схематическое строение рудной гранулы:

ξ – толщина слоя границы; индексами «к», «м», «г», «в», «р» обозначены соответственно корка, магнетит, гематит, вустит, руда

Fig. 1. Schematic structure of the ore pellet:

ξ – thickness of boundary layer; «к», «м», «г», «в», «р» indices denote crust, magnetite, hematite, wustite, ore correspondingly

В общем случае при обжиге магнетитовых окатышей схематическое строение рудной гранулы будет иметь вид, представленный на рис. 1. В процессе окисления гранулы в зоне подогрева и начальном участке зоны обжига на ее (гранулы) поверхности образуется гематитовая корка, толщина которой определяется содержанием кислорода в газе и скоростью нагрева материала. При переходе в зону восстановления получают развитие реакции восстановления; в объеме гранулы образуются кольца железа и его оксидов. Можно выделить пять слоев различных состояний рудной составляющей окатыша, как это показано на рис. 1.

Для решения задачи восстановления рудной гранулы важно знать кривые распределения концентраций восстановителей и газообразных продуктов реакции по радиусу. Как уже отмечалось выше, для этого необходимо решать внутреннюю задачу нестационарной диффузии многокомпонентного газа в порах гранулы. В целях упрощения математической модели обжиговой машины используем, однако, другой подход, а именно приближенный метод решения задачи Стефана, развитый Л.С. Лейбензоном [15]. Предположим, что в каждый момент времени для заданной концентрации компонента газа в макропорах окатыша в объеме гранулы успевает установиться квазистационарное распределение. Все реакции восстановления оксидов железа протекают не на поверхности микропор соответствующего слоя гранулы, а на разделяющих эти слои фронтальных поверхностях, причем восстановление центрального объема первоначального магнетита (слой 1) не получает развитие до тех пор, пока соседняя гематитовая область (слой 2) не восстановится до Fe_3O_4 . При таких допущениях изменение концентрации CO по радиусу рудной гранулы будет описываться следующей системой уравнений:

– уравнение стационарной диффузии

$$\frac{1}{\xi_p^2} \frac{d}{d\xi_p} \left(D_{i\text{CO}} \xi_p^2 \frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} \right) = k_{2,2} \left(C_{\text{CO}} - \frac{C_{\text{CO}_2}}{K_{2,2}} \right) \times \\ \times \delta(\xi_p - \xi_m) + k_{2,3} \left(C_{\text{CO}} - \frac{C_{\text{CO}_2}}{K_{2,3}} \right) \delta(\xi_p - \xi_v); \quad (1)$$

– граничные условия

$$\xi_p = \xi_r, \quad D_{\text{mCO}} \xi_p^2 \frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} = k_{2,1} \left(C_{\text{CO}} - \frac{C_{\text{CO}_2}}{K_{2,1}} \right); \quad (2)$$

$$\xi_p = r_p, \quad D_{\text{жCO}} \frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} = \beta_{2\text{CO}} (C_{\text{CO}}^0 - C_{\text{CO}}); \quad (3)$$

здесь C_{CO} и C_{CO_2} – концентрация соответствующего газового компонента (CO или CO_2); $k_{2,i}$ – эффективные константы скорости реакций восстановления оксидов железа CO на i -й ступени восстановления; $K_{2,i}$ – их константы равновесия; $D_{k\text{CO}}$ – эффективные коэффициенты диффузии оксида углерода в k -ом слое рудной гранулы; $\beta_{2\text{CO}}$ – коэффициент массообмена по CO на поверхности рудной гранулы, где концентрация равна C_{CO}^0 ; $\delta(x)$ – символ Кронекера, причем

$$\delta(\xi_p - \xi_m) = \begin{cases} 0 & \text{при } \xi_p \leq \xi_m; \\ > 0 & \text{при } \xi_p > \xi_m, \end{cases}$$

и аналогично для $\delta(\xi_p - \xi_v)$.

Такая же система уравнений может быть записана для диоксида углерода. При этом все эффективные коэффициенты диффузии следует заменить на $D_{k\text{CO}_2}$ и изменить знаки правых частей уравнений (1) и (2) на противоположные.

Для всех значений ξ_p , за исключением $\xi_p = \xi_m$ и $\xi_p = \xi_v$ правая часть уравнения (1) равна нулю. Поэтому в пределах каждого слоя рудной гранулы кривая изменения концентрации будет представлять собой отрезок гиперболы

$$C_{\text{CO}} = -\frac{1}{D_{k\text{CO}} \xi} A_k + A_{1k}, \quad (4)$$

т.е.

$$C_{\text{CO}} = -\frac{1}{D_{\text{мCO}} \xi_p} A_{\text{м}} + A_{1\text{м}} \quad \text{при } \xi_r \leq \xi_p < \xi_m; \quad (4.1)$$

$$C_{\text{CO}} = -\frac{1}{D_{\text{вCO}} \xi_p} A_{\text{в}} + A_{1\text{в}} \quad \text{при } \xi_m < \xi_p < \xi_v; \quad (4.2)$$

$$C_{\text{CO}} = -\frac{1}{D_{\text{жCO}} \xi_p} A_{\text{ж}} + A_{1\text{ж}} \quad \text{при } \xi_v < \xi_p < r_p; \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{CO}}{d\xi_p} &= \frac{A_m}{\xi_p^2} \text{ при } \xi_r \leq \xi_p < \xi_m; \\ \frac{dC_{CO}}{d\xi_p} &= \frac{A_b}{\xi_p^2} \text{ при } \xi_m < \xi_p < \xi_b; \\ \frac{dC_{CO}}{d\xi_p} &= \frac{A_{ж}}{\xi_p^2} \text{ при } \xi_b < \xi_p < r_p. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Можно показать, что кривая концентрации СО непрерывна, в то время как ее производная на фронтальных поверхностях претерпевает разрыв, причем при переходе через границу $\xi_p = \xi_m$ скачок концентрации составляет $k_{2,2} \left(C_{CO} - \frac{C_{CO_2}}{K_{2,2}} \right)_{\xi_p = \xi_m}$, а при переходе через $\xi_p = \xi_b$ — на $k_{2,3} \left(C_{CO} - \frac{C_{CO_2}}{K_{2,3}} \right)_{\xi_p = \xi_b}$. Отмеченное выше

справедливо также для кривой изменения концентрации диоксида углерода. Таким образом, с учетом четырех граничных условий типа (2), (3) получаем систему из восьми уравнений для отыскания восьми неизвестных, определяющих профили концентрации СО (A_k , A_{1k}) и CO_2 (B_k , B_{1k}). Процедура решения этой системы тривиальна, а сами решения здесь не приводятся ввиду их громоздкости. В компактной форме записи они имеют вид

$$A_m = -B_m = \frac{\Delta_{m2}}{\Delta_2}; A_b = -B_b = \frac{\Delta_{b2}}{\Delta_2}; A_{ж} = -B_{ж} = \frac{\Delta_{ж2}}{\Delta_2}, \quad (5)$$

где Δ_2 — определитель упомянутой выше системы; Δ_{k2} — ее алгебраические дополнения.

Коэффициенты A_{1k} и B_{1k} выражаются через A_k , B_k и концентрации СО и CO_2 в макропорах окатыша.

Аналогичные выражения могут быть записаны для случая восстановления оксидов железа водородом.

Переходя от молярных концентраций компонентов газа к их объемным долям

$$C_{CO} = \frac{\rho_{CO} CO}{M_{CO}}, \quad C_{H_2} = \frac{\rho_{H_2} H_2}{M_{H_2}}$$

и т.д. и используя основные положения кинетики последовательно-параллельных реакций [2, 3, 7, 8, 12 – 14], получим следующие выражения, определяющие закономерности изменения границ раздела зон рудной гранулы и мощностей источников (стоков) теплоты:

— для гематитовой зоны (зона 2)

$$\begin{aligned} \rho_p g'_{Fe_2O_3} \frac{\partial \xi_r}{\partial \tau} &= -\frac{3}{\xi_r^2} \left(80 \rho_{H_2} \frac{\Delta_{m1}}{\Delta_1} + 5,7143 \rho_{CO} \frac{\Delta_{m2}}{\Delta_2} \right) = \\ &= -\frac{3}{\xi_r^2} (80 v_{1,1} + 5,7143 v_{1,2}) \text{ кг } Fe_2O_3/\text{с}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f_{гем} q_{гем} &= -\frac{9DR}{r_p^3} \frac{\rho_m}{\rho_p} \chi_{V_2} \times \\ &\times (80 v_{1,1} q_{1гем} + 5,7143 v_{1,2} q_{2гем}) \text{ Вт/м}^3; \end{aligned} \quad (7)$$

— для магнетитовой зоны (зона 3)

$$\begin{aligned} \rho_p g'_{Fe_3O_4} \left(\xi_m^2 \frac{\partial \xi_m}{\partial \tau} - \xi_r^2 \frac{\partial \xi_r}{\partial \tau} \right) &= 2(116 v_{1,1} + 8,2857 v_{2,1}) - \\ &- \xi_m^2 (116 v_{1,2} + 8,2857 v_{2,2}) \text{ кг } Fe_3O_4/\text{с}; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_{маг} q_{маг} &= -\frac{3DR}{r_p^3} \frac{\rho_m}{\rho_p} \chi_{V_2} \xi_m^2 \times \\ &\times (116 v_{1,2} q_{1маг} + 8,2857 v_{2,2} q_{2маг}) \text{ Вт/м}^3; \end{aligned} \quad (9)$$

— для вюститной зоны (зона 4)

$$\begin{aligned} \rho_p g'_{FeO} \left(\xi_b^2 \frac{\partial \xi_b}{\partial \tau} - \xi_m^2 \frac{\partial \xi_m}{\partial \tau} \right) &= 3 \xi_b^2 (36 v_{1,2} + 2,5714 v_{2,2}) - \\ &- \xi_b^2 (36 v_{1,3} + 2,5714 v_{2,3}) \text{ кг } FeO/\text{с}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_b q_b &= -\frac{3DR}{r_p^3} \frac{\rho_m}{\rho_p} \chi_{V_2} \xi_b^2 \times \\ &\times (36 v_{1,3} q_{1b} + 2,5714 v_{2,3} q_{2b}) \text{ Вт/м}^3. \end{aligned} \quad (11)$$

В этих выражениях $g'_{Fe_2O_3}$ — массовая доля гематита при его равномерном распределении по всему объему

рудной гранулы, $g'_{Fe_2O_3} = g_{Fe_2O_3}^k \frac{r_p^3}{r_p^3 - (\xi_p^k)^3}$; $g_{Fe_2O_3}^k$ — доля

гематита в грануле перед началом восстановления; ρ_p и ρ_m — плотности руды и окатыша; $q_{l,k}$ — удельные тепловые эффекты реакций восстановления H_2 и СО на отдельных ступенях, а скорости восстановления $v_{l,k}$ определяются уравнениями

$$\begin{aligned} v_{1,2} &= \rho_{H_2} k_{1м} \left[\left(\frac{1}{D_{mH_2}} \frac{\xi_m - \xi_r}{\xi_m \xi_r} + \frac{1}{k_{1r} \xi_r^2} \right) \frac{\Delta_{m1}}{\Delta_1} + \right. \\ &\left. + (H_2^0 - H_2O^0) \left(\frac{1}{K_{1,1} + 1} - \frac{1}{K_{1,2} + 1} \right) \right]; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} v_{2,2} &= \rho_{CO} k_{2,2} \left[CO^0 - \frac{CO_2^0}{K_{2,2}} - \left(\frac{1}{D_{bCO}} + \frac{1}{K_{2,2} D_{bCO_2}} \right) \times \right. \\ &\times \frac{\xi_b - \xi_m}{\xi_b \xi_m} \frac{\Delta_{b2}}{\Delta_2} - \left(\left(\frac{1}{D_{жCO}} + \frac{1}{K_{2,2} D_{жCO_2}} \right) \frac{r_p - \xi_b}{r_p \xi_b} + \right. \\ &\left. \left. + \left(\frac{1}{\beta_{2CO}} + \frac{1}{K_{2,2} \beta_{2CO_2}} \right) \frac{1}{r_p^2} \right) \frac{\Delta_{ж2}}{\Delta_2} \right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$v_{1,3} = \rho_{H_2} k_{1,3} \left[H_2^0 - \frac{H_2^0 + H_2O^0}{K_{1,3} + 1} - \left(\frac{1}{D_{жH_2}} \frac{r_p - \xi_{св}}{r_p \xi_{св}} + \frac{1}{\beta_{1H_2} r_p^2} \right) \frac{\Delta_{ж1}}{\Delta_1} \right]; \quad (14)$$

выражение для $v_{2,3}$ отличается от уравнения (13) лишь тем, что в нем вместо $k_{2,2}$ и $K_{2,2}$ стоят коэффициенты $k_{2,3}$ и $K_{2,3}$.

В вышеприведенных уравнениях $k_{1k} = k_{1k} \frac{K_{1,k} + 1}{K_{1,k}}$.

При вычислениях константы равновесия принимались по данным работы [2], а эффективные константы скоростей реакций $k_{1,k}$ – по экспериментальным данным, а также данным, приведенным в работах [3, 5, 7, 13, 14]. Тепловые эффекты реакций q_{jk} рассчитывались по выражениям, построенных на основе таблиц, приведенных в указанных источниках, с использованием метода наименьших квадратов.

Система уравнений для объемных долей компонентов газа определяется типом газовой атмосферы. Если слой обрабатывается продуктами полного (CO_2 , H_2O , N_2) или частичного (CO , CO_2 , H_2 , H_2O , N_2) сжигания топлива, то она включает семь уравнений, так как, помимо перечисленных компонентов газа, неизвестными являются также скорость фильтрации $v_{ог}$ и массовая скорость $G_{с.г}$. При наличии в атмосфере свободного кислорода добавляется еще одно выражение. Тип атмосферы изменяет также итоговую систему дифференциальных уравнений, описывающих физико-химические аспекты процесса обжига рудугольных окатышей. Подробно эти вопросы здесь не рассматриваются, поскольку они относительно легко учитываются в рамках, изложенных в работе [1], а также в настоящем исследовании.

Изложенная методика в совокупности с моделью [1] широко использует адаптацию расчетных значений к экспериментальным данным, поэтому некоторые коэффициенты D_{kl} , используемые в модели, можно назвать коэффициентами диффузии лишь условно. Тем не менее, при использовании эффективных схем численного решения уравнений [16–20] получаемые при моделировании результаты и рекомендации весьма хорошо соответствуют промышленным данным. Для иллюстрации этого положения на рис. 2 показана зависимость удельного расхода топлива V_T , m^3/t , от удельной производительности машины g , $t/(ч \cdot m^2)$, для двух высот слоя: 350 мм – кривая 1 и 450 мм – кривая 2.

Выводы. Рассмотрены вопросы учета физико-химических аспектов процесса обжига металлизированных окатышей на конвейерной машине. Показано, что в совокупности с ранее разработанной математической моделью процесса обжига рудугольных окатышей такой подход позволяет получать рекомендации и результаты, хорошо соответствующие промышленным условиям.

Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива от удельной производительности обжиговой машины

Fig. 2. Dependence of specific fuel consumption on specific productivity of firing machine

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Лавров В.В. Математическая модель процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 4. С. 12–24.
- Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов; изд. 2-е. Ч. 1. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 671 с.
- Szekely J., Evans J.W., Sohn H.Y. Solid – Gas Reactions. – N.Y.: Academic Press, 1976. – 400 p.
- Бабушкин Н.М., Тимофеев В.Н. Горение топлива в слое агломерационной шихты. – В кн.: Теплотехника доменного и агломерационного процессов: Сб. научн. трудов ВНИИМТ, №14. – М.: Металлургия, 1966. С. 139–159.
- Takahashi Y., Takahashi R. Reduction of Iron Pellets by Using a Laboratory Scale Moving Bed Reactor at High Pressure. – In: Proc. VIII Joint Japan – USSR Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes. Tokyo, 1981. P. 78–92.
- Экономос М. Реакции в твердой фазе в ферритах. – В кн.: Кинетика высокотемпературных процессов / Под ред. У.Д. Кинджери. – М.: Металлургия, 1965. С. 168–180.
- Yagi I., Szekely J. Mathematical formulation on iron oxide pellets in moving beds with nonuniform gas and solids flow // Trans. Iron and Steel Inst. Japan. 1977. No. 10. P. 569–575.
- Макрокинетика восстановления железорудных материалов газами: математическое описание / С.Д. Абрамов, Л.Ф. Алексеев, Д.З. Кудинов, А.В. Ченцов, С.В. Шаврин. – М.: Наука, 1982. – 105 с.
- Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 492 с.
- Боковиков Б.А. Методы расчета слоевых процессов и агрегатов для металлизации и их развитие. – В кн.: Физикохимия прямого получения железа. – М.: Наука, 1977. С. 84–87.
- Боковиков Б.А., Поволоцкий В.Ю., Гиммельфарб А.И., Неменов А.М. Анализ шахтного восстановительного процесса с помощью математической модели // Прямое получение железа и порошковая металлургия: Тематич. отрасл. сб. № 1. – М.: Металлургия, 1974. С. 107–113.
- Ростовцев С.Т. Теория металлургических процессов. – М.: Металлургиздат, 1956. – 514 с.
- Funghini A., Fontana P., Marchi G. De. In: The operation of the blast furnace: theory and practice. – Arles: 1980. Vol. 2. P. B. 2.1–B. 2.6.
- Богданди Л., Энгель Г.Ю. Восстановление железных руд. – М.: Металлургия, 1971. – 520 с.
- Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига: Звайгзне, 1967. – 457 с.
- Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
- Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев;

под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.

18. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса: учебник для вузов / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон. – М.: Интермет-Инжиниринг, 1999. – 520 с.

19. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1987. – 688 с.
20. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с.

Поступила 14 сентября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 4, pp. 288–293.

MODELING OF METALIZED PELLETS FIRING WITH THE ACCOUNT OF PHYSICO-CHEMICAL TRANSFORMATIONS IN THEM

V.S. Shvydkii, Yu.G. Yaroshenko, N.A. Spirin, V.V. Lavrov

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

Abstract. The engineering mathematical model of development of physico-chemical transformations is considered in the volume of pellet, consisting of granules of iron-stone, limestone and coke (carbon-containing fuel). It is shown that according to the experimental information there are mathematical models, using the three-stage chart of renewal. Strict mathematical description of process of renewal on this chart requires the joint decision of kinetics tasks of successive-parallel reactions and diffusion of multicomponent gas in the pores of ore piece. Such approach cannot be used in the mathematical model of process of metallised pellets burning because of its complication. This complication increases at the account of characteristic feature of the gas and temperature mode of burning machine, producing metallised pellets: change of gas composition during material movement (transition from an oxidizing atmosphere to restoration or neutral). For the decision of the task of ore granule renewal it is important to know the distribution curves of the concentrations of reducing agents and gaseous reaction products along the radius. Because of complication of the equalizations of diffusion, heating of granules and chemical kinetics, the close method of decision of Stefan problem, developed by L.S. Leybenzon, is used, essence of which is in supposition, quasi stationary distribution has time in the volume of granule to be set. All oxide reduction reactions occur not on the surface of the micropores of the corresponding granule layer, but on the frontal surfaces separating these layers and the restoration of the central volume of the original magnetite does not develop until the neighboring hematite region is recovered to Fe_3O_4 . At such conditions all complication of the simplified mathematical model is compensated by the proper choice of algorithm of numeral decision of the equalizations system. As a row of simplifications doesn't correspond to reality (for example, the layer of metallic iron is not skipped by a gas-reducer), it is necessary to use effective coefficients, the value of which is set during the model adaptation.

Keywords: physico-chemical transformations, pellet, granule, layers of ore granule, quasi stationary state, Stefan's task, surface of pores, frontal surface.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-4-288-293

REFERENCES

1. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Mathematical model of burning process of coal-ore pellets on conveyor machine. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*. = *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 4, pp. 12–24. (In Russ.).
2. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov. Ch. I* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes. Part 1]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1962, 671 p. (In Russ.).
3. Szekely J., Evans J.W., Sohn H.Y. *Solid – gas reactions*. N.Y.: Academic Press, 1976, 400 p.
4. Babushkin N.M., Timofeev V.N. Fuel burning in sintering mixture layer. In: *Teplotekhnika domennogo i aglomeratsionnogo protsessov: Sb. nauchn.trudov VNIIMT, no. 14* [Heat engineering of blast furnace and agglomeration processes. Coll. of sci. works of VNIIMT, no. 14]. Moscow: Metallurgiya, 1966, pp. 139–159. (In Russ.).
5. Takahashi Y., Takahashi R. Reduction of iron pellets by using a laboratory scale moving bed reactor at high pressure. In: *Proc. of 8th Joint Japan – USSR. Symposium on Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. Tokyo, 1981, pp. 78–92.
6. Ekonomos M. Solid phase reactions in ferrites. In: *Kinetika vysokotemperaturnykh protsessov* [Kinetics of high-temperature processes]. Kingery W.D. ed. Moscow: Metallurgiya, 1965, pp. 168–180. (In Russ.).
7. Yagi I., Szekely J. Mathematical formulation on iron oxide pellets in moving beds with nonuniform gas and solids flow. *Trans. Iron and Steel Inst. Japan*. 1977, no. 10, pp. 569–575.
8. Abramov S.D., Alekseev L.F., Kudinov D.Z., Chentsov A.V., Shavrin S.V. *Makrokinetika vosstanovleniya zhelezorudnykh materialov gazami: matematicheskoe opisanie* [Macrokinetics of reduction of iron ore materials by gases: mathematical description]. Moscow: Nauka, 1982, 105 p. (In Russ.).
9. Frank-Kamenetskii D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka, 1987, 492 p. (In Russ.).
10. Bokovikov B.A. Calculating methods for layer processes and metallization units and their development. In: *Fizikokhimiya pryamogo polucheniya zheleza* [Physicochemistry of direct iron production]. Moscow: Nauka, 1977, pp. 84–87. (In Russ.).
11. Bokovikov B.A., Povolotskii V.Yu., Gimmel'farb A.I., Nemenov A.M. Analysis of the mine recovery process using the mathematical model. In: *Pryamoe poluchenie zheleza i poroshkovaya metallurgiya: Tematich. otrasl. sb. no. 1* [Direct iron production and powder metallurgy: Thematic industrial coll. no. 1]. Moscow: Metallurgiya, 1974, pp. 107–113. (In Russ.).
12. Rostovtsev S.T. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgizdat, 1956, 514 p. (In Russ.).
13. Funghini A., Fontana P., Marchi G. De. In: *The operation of the blast furnace: theory and practice. Arles*, 1980, vol. 2, pp. 2.1–2.6.
14. Bogdandy L., Engell H.-J. *Die Reduktion der Eisenerze*. Duesseldorf: Springer Verlag, 1967, 539 p. (Russ.ed.: Bogdandy L., Engell H.-J. *Vosstanovlenie zheleznykh rud*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 519 p.).
15. Rubinshtein L.I. *Problema Stefana* [Stefan problem]. Riga: Zvaigzne, 1967, 457 p.
16. Patankar Suhas V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. (Russ.ed.: Patankar S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti*. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 152 p.).
17. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in the automated process control system]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: ООО «UIPTs», 2014, 558 p. (In Russ.).

18. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. *Elementy teorii sistem i chislennye metody modelirovaniya protsessov teplomassoperenosa: uchebnik dlya vuzov* [Elements of systems theory and numerical modeling methods of processes of heat and mass transfer]. Moscow: Internet-Inzhiniring, 1999, 520 p. (In Russ.).
19. Zhukhovitskii A.A., Shvartsman L.A. *Fizicheskaya khimiya: uchebnik dlya vuzov* [Physical chemistry: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 688 p. (In Russ.).
20. Shih Tien-Mo. *Numerical Heat Transfer*. Hemisphere Pub. Corp., Washington, 1984, 563 p. (Russ.ed.: Shih T. *Chislennye metody v zadachakh teploobmena*. Moscow: Mir, 1988, 544 p.).

Information about the authors:

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

Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (yury-y@planet-a.ru)

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

V.V. Lavrov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (v.v.lavrov@urfu.ru)

Received September 14, 2017