

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 669.053.75

*В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спиринов, В.В. Лавров*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. ЕльцинаМОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ
ОКАТЫШЕЙ С УЧЕТОМ ПРОИСХОДЯЩИХ В НИХ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ*

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 рудугольных 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 восстановления оксидов железа рудных гранул окатыша. Как показывает обзор литературы [2 – 8], 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 рудугольных окатышей вследствие своей сложности, и его необходимо упростить до разумного предела.

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 [9]. 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 развития 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:

– уравнением стационарной диффузии

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

$$+ k_{2,3} \left(C_{\text{CO}} - \frac{C_{\text{CO}_2}}{K_{2,3}} \right) \delta(\xi_p - \xi_b); \quad (1)$$

*Из материалов конференции «Металлургия-2017», г. Новокузнецк.

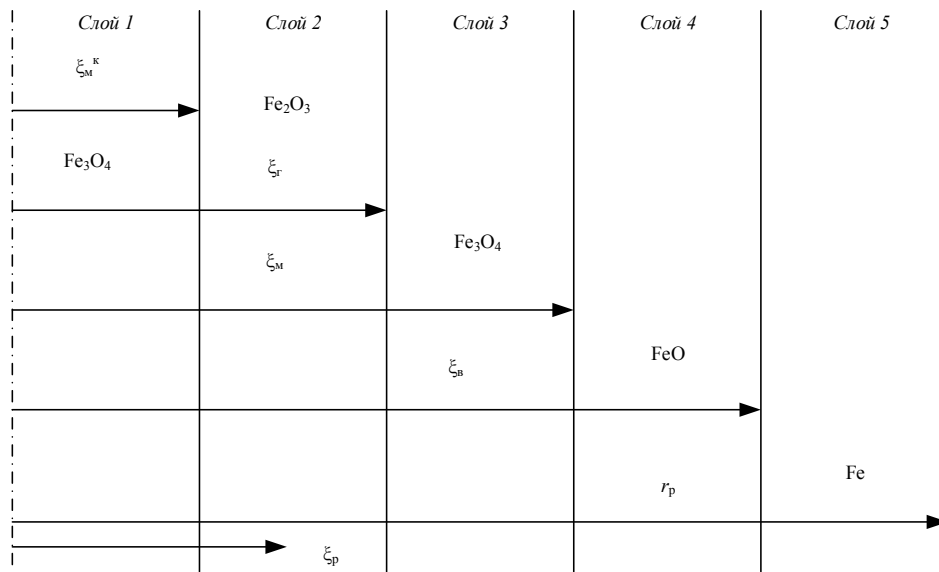


Рис. 1. Схематическое строение рудной гранулы:
 ξ – толщина слоя гранулы; индексами «к», «м», «г», «в», «р» обозначены соответственно корка, магнетит, гематит, вюстит, руда

– с граничными условиями

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

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

здесь C_{CO} и C_{CO_2} – концентрация соответствующего газового компонента (CO или CO₂); $k_{2,i}$ – 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

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

т.е.

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

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

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

$$\frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} = \frac{A_m}{\xi_p^2} \quad \text{при } \xi_g \leq \xi_p < \xi_m;$$

$$\frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} = \frac{A_{\text{ж}}}{\xi_p^2} \quad \text{при } \xi_v < \xi_p < r_p; \quad (4.4)$$

$$\frac{dC_{\text{CO}}}{d\xi_p} = \frac{A_v}{\xi_p^2} \quad \text{при } \xi_m < \xi_p < \xi_v.$$

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 $k_{2,2}(C_{CO} - C_{CO_2} / K_{2,2})_{\xi_p = \xi_m}$, а при переходе через $\xi_p = \xi_b$ – $k_{2,3}(C_{CO} - C_{CO_2} / K_{2,3})_{\xi_p = \xi_b}$. 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 СО₂ (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

$$\begin{aligned} A_m = -B_m = \Delta_{m2}/\Delta_2; \quad A_b = -B_b = \Delta_{b2}/\Delta_2; \\ A_{jk} = -B_{jk} = \Delta_{jk2}/\Delta_2, \end{aligned} \quad (5)$$

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 СО₂ в макропорах окатыша.

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

Переходя от мольных концентраций компонентов газа к их объемным долям

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

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

– для гематитовой зоны (зона 2)

$$\begin{aligned} \rho_p g'_{Fe_2O_3} \frac{\partial \xi_r}{\partial \tau} = -\frac{3}{\xi_r^2} \left(80 \rho_{H_2} \frac{\Delta_{m1}}{\Delta_1} + 5,7143 \rho_{CO} \frac{\Delta_{m2}}{\Delta_2} \right) = \\ = -\frac{3}{\xi_r^2} (80 v_{1,1} + 5,7143 v_{1,2}) \quad \text{кг Fe}_2\text{O}_3/\text{с}; \end{aligned} \quad (6)$$

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

– для магнетитовой зоны (зона 3)

$$\begin{aligned} \rho_p g'_{Fe_3O_4} \left(\xi_m^2 \frac{\partial \xi_m}{\partial \tau} - \xi_r^2 \frac{\partial \xi_r}{\partial \tau} \right) = 2(116 v_{1,1} + 8,2857 v_{2,1}) - \\ - \xi_m^2 (116 v_{1,2} + 8,2857 v_{2,2}) \quad \text{кг Fe}_3\text{O}_4/\text{с}; \end{aligned} \quad (8)$$

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

– для вюститной зоны (зона 4)

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

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

В этих выражениях $g'_{Fe_2O_3}$ – массовая доля гематита при его равномерном распределении по всему объему рудной гранулы; $g'_{Fe_2O_3} = g_{Fe_2O_3}^k r_p^3 / [r_p^3 - (\xi_p^k)^3]$; $g_{Fe_2O_3}^k$ – доля гематита в грануле перед началом восстановления; ρ_p и ρ_m – плотности руды и окатыша; $q_{l,k}$ – удельные тепловые эффекты реакций восстановления H₂ и СО на отдельных ступенях, а скорости восстановления $v_{l,k}$ определяются уравнениями

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

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

$$v_{1,3} = \rho_{H_2} k_{1b} \left[H_2^0 - \frac{H_2^0 + H_2 O^0}{K_{1,3} + 1} - \right.$$

$$-\left(\frac{1}{D_{\text{жH}_2}} \frac{r_p - \xi_{\text{в}}}{r_p \xi_{\text{в}}} + \frac{1}{\beta_{\text{IH}_2} r_p^2} \right) \frac{\Delta_{1\text{ж}}}{\Delta_1} \Bigg]; \quad (14)$$

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 $k_{1k} = k_{1,k} (K_{1,k} + 1)/K_{1,k}$. При вычислениях константы равновесия принимались по данным работы [2], а эффективные константы скоростей реакций $k_{l,k}$ – по экспериментальным данным, а также данным, приведенным в работах [3, 5, 7]. Тепловые эффекты реакций q_{lk} рассчитывались по выражениям, построенным 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 $v_{0г}$ 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, получаемые при мо-

делировании результаты и рекомендации весьма хорошо соответствуют промышленным данным. Для иллюстрации этого положения на рис. 2 показана зависимость удельного расхода топлива $V_{\text{т}}$, $\text{м}^3/\text{т}$, от удельной производительности машины g , $\text{т}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$, 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов; изд. 2-е. Ч. 1. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 671 с.
3. Szekely J., Evans J.W., Sohn H.Y. Solid – Gas Reactions. – N.Y.: Academic Press, 1976. – 400 p.
4. 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.
5. 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.

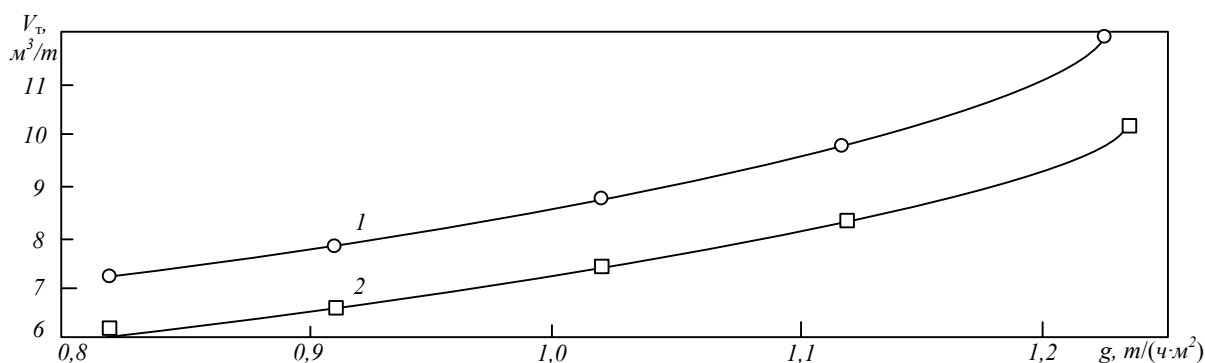


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива от удельной производительности обжиговой машины

6. Экономос М. Реакции в твердой фазе в ферритах. – В кн.: Кинетика высокотемпературных процессов / Под ред. У.Д. Кинджери. – М.: Металлургия, 1965. С. 168 – 180.
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. P. 569 – 575.
8. 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.
9. Рубинштейн Л.И. Проблема Стефана. – Рига: Звайгзне, 1967. – 457 с.

© 2018 г. В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко,
Н.А. Спирин, В.В. Лавров
Поступила 30 ноября 2017 г.