

УДК 622.788

Д. А. Ковалёв, Н. Д. Ванюкова, М.Н. Бойко

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЖИГОМ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

Введение

В настоящее время во всём мире активно ведутся работы по разработке и использованию математических моделей обжига окатышей [1-3]. Принципиальное отличие разработанной модели от ранее предлагаемых и используемых состоит в том, что здесь расширены и рассмотрены более последовательно процессы теплообмена между слоем окатышей и газом, разложение известняка, окисление магнетита, окисление углерода при моделировании обжига углеродсодержащих окатышей.

Постановка проблемы. При производстве окатышей большое внимание уделяется проблемам снижения расхода энергоресурсов и повышению качества конечного продукта. Совершенствование системы управления является необходимым условием для их решения. При построении системы управления в её основу положено моделирование технологических процессов – для прогнозирования свойств окатышей и оптимизации процесса обжига. Цель данной работы – разработка математической модели обжига окатышей на конвейерной машине.

Изложение основного материала исследований. Модель основана на описании реальных физико-химических и тепловых процессов, протекающих при обжиге окатышей. Испарение влаги, разложение известняка, окисление магнетита и окисление углерода анализируются с позиций кинетики. Для общего случая топохимического реагирования модель массопереноса включает химическое взаимодействие и диффузию газового компонента в пограничной пленке и через пористый слой продукта взаимодействия.

Основные положения и допущения, принятые в модели:

Сырые окатыши образуют горизонтальный слой постоянной высоты $h_{сл}$, состоящий из окатышей заданного среднего диаметра $d_{ок}$, расположенных с порозностью ε .

Каждый сухой окатыш состоит из магнетита Fe_3O_4 , массовая доля которого составляет p_1 , известняка $CaCO_3$ с массовой долей p_2 , углерода с массовой долей p_3 , а также бентонита с массовой долей $1 - p_1 - p_2 - p_3$.

Все окатыши имеют одинаковую пористость ε_1 , которая представляет объемную долю пустот (пор) от всего объема окатыша.

Из-за малого диаметра окатыши принимаются изотермичными, перепад температур по толщине окатыша считается пренебрежимо малым.

Теплопроводность слоя из-за малой площади контакта окатышей не учитывается.

По ширине слоя температурный градиент отсутствует.

В слое суммарная теплота в пустотах, заполненных газом, в любой момент времени пренебрежимо мала по сравнению с теплотой окатышей.

Тепловые потери при обжиге окатышей не учитываются.

Слой окатышей перемещается в горизонтальном направлении с постоянной скоростью, последовательно проходя зоны сушки, подогрева, обжига 1, обжига 2 и охлаждения.

В каждой зоне в слой окатышей сверху вниз поступает поток газа со своей постоянной скоростью, температурой и содержанием кислорода.

Базовые уравнения модели. В модели использованы следующие основные уравнения:

Дифференциальное уравнение удаления влаги в слое окатышей [4]:

$$L_{H_2O} \cdot \rho_{ок} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial W_{H_2O}}{\partial \tau} = -\alpha_V \cdot (t_G - t_{исп}), \quad (1)$$

где L_{H_2O} - скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг H_2O ;
 $W_{H_2O} = W_{H_2O}(x, \tau)$ - функция распределения массовой доли влаги в окатышах по высоте слоя; $t_{исп} = 100^\circ C$ - температура испарения влаги; $\rho_{ок}$ - плотность сухих окатышей, кг/м³; ε - порозность слоя, доли ед; t_G - температура газа по высоте слоя, $^\circ C$; α_V - объемный коэффициент теплоотдачи, Вт / (м³К).

Принимаем, что при наличии влаги в окатышах, т.е. при $W_{H_2O} > 0$, вся теплота, подводимая к окатышам, идет на испарение H_2O . Конденсацию влаги в нижележащих горизонтах слоя не учитываем. В этот период температура окатышей не превышает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После удаления всей влаги, когда $W_{H_2O} = 0$, нагрев окатышей можно выразить дифференциальным уравнением теплового баланса для слоя сухих окатышей, где скорость изменения температуры окатышей в слое является функцией теплопереноса от газа и теплоты окисления магнетита, а также потерь теплоты диссоциации известняка и теплоты реакций окисления углерода:

$$\rho_{ок} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot C_{ок} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha_V \cdot (t_{Г} - t_{ОК}) + Q_1 - Q_2 + Q_3, \quad (2)$$

$C_{ок}$ – теплоемкость окатышей, Дж/(кг·К); $t_{ОК} = t_{ОК}(x, \tau)$ – функция распределения температуры окатышей по высоте слоя $^{\circ}\text{C}$; τ – время, с; α_V – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·К); $t_{Г}$ – температура газа по высоте слоя, $^{\circ}\text{C}$; Q_1 – теплота реакции окисления магнетита, выделяющееся в единице объема слоя, Вт/м³; Q_2 – теплота реакции разложения известняка, поглощающаяся в единице объема слоя, Вт/м³; Q_3 – теплота реакции окисления углерода, выделяющаяся в единице объема слоя окатышей, Вт/м³.

Объемный коэффициент теплоотдачи конвекцией от газа окатышам определяется по формуле [5]:

$$\alpha_V = 186 \cdot \frac{W_{Г}^{0,9} \cdot (t_{Г} + 273)^{0,3}}{d_{ОК}^{0,75}} \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение теплового баланса для газа:

$$\rho_{Г} \cdot C_{Г} \cdot W_{Г} \cdot \frac{\partial t_{Г}}{\partial x} = \alpha_V \cdot (t_{ОК} - t_{Г}), \quad (4)$$

где $\rho_{Г}$ – плотность газа, кг/м³; $C_{Г}$ – теплоемкость газа, Дж/(м³·К); $t_{Г} = t_{Г}(x, \tau)$ – функция распределения температуры газа по высоте слоя, $^{\circ}\text{C}$; x – координата, направленная по высоте слоя сверху вниз, м; $W_{Г}$ – нормальная скорость движения газа на свободное сечение слоя, м/с.

В разработанной модели рассматриваются следующие физико-химические процессы, протекающие во время обжига окатышей.

1. Диссоциация известняка.
2. Окисления магнетита.
3. Окисления углерода (при добавке в шихту твердого топлива).

Для описания процесса окисления магнетита в окатышах принята модель, в которой реакция окисления протекает от поверхности окатыша к его центру и определяется массообменом на поверхности окатыша и скоростью диффузии кислорода с поверхности окатыша к еще неокисленному ядру, а также скоростью протекания реакции окисления [6].

$$V = \frac{16\pi r_m^2(\tau) \cdot P \cdot (C_{O_2}^{равн} - C_{O_2})}{R_o T_{ок} \cdot \left\{ \frac{1}{k_r} + \frac{r_m^2(\tau)}{r_{ок}^2 \cdot k_{gO_2}} + \frac{r_m(\tau)}{D_{O_2}} \cdot \left[1 - \frac{r_m(\tau)}{r_{ок}} \right] \right\}}, \quad (5)$$

где V – скорость реакции окисления магнетита, моль Fe_3O_4 м/с;

$r_m(\tau)$ – радиус ядра еще неокисленного магнетита, м; $r_{ок} = \frac{d_{ок}}{2}$ – радиус окатыша, м; P – общее давление газа, Па; $C_{O_2}^{равн}$ – равновесная объемная концентрация O_2 , моль/м³; C_{O_2} – объемная концентрация O_2 у поверхности окатыша, моль/м³; R_o – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $T_{ок} = t_{ок} + 273$ – температура окатыша, К; k_r – скорость химической реакции окисления магнетита, м/с; k_{gO_2} – Равновесная объемная концентрация O_2 определяется упругостью диссоциации гематита и зависит от температуры. Движение границы реакции определяется уравнением:

$$\frac{dr_m(\tau)}{d\tau} = - \frac{V \cdot M_{Fe_3O_4}}{4\pi r_m^2(\tau) \rho_{ок} (1 - \varepsilon_1) p_1}, \quad (6)$$

где ε_1 – пористость окатышей; $M_{Fe_3O_4}$ – молекулярная масса Fe_3O_4 .

Скорость реакции окисления выражается зависимостью:

$$k_r = 300 \cdot e^{\left(\frac{6000}{T_{ок}} \right)}, \text{ м/с.} \quad (7)$$

Для описания массообмена на поверхности окатышей применяется критериальная зависимость вида [4]:

$$Sh = \frac{kr}{D} \cdot d = A_0 + A_1 \cdot Re^m \cdot Sc^n \quad (8)$$

Где A_0 , m , n – константы, зависящие от природы вещества и газа, Re – число Рейнолдса, Sc – число Шмидта.

Для шарообразного образца используется уравнение Ранца-Маршала:

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot \Phi \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \quad (9)$$

где Φ – поправочный коэффициент, принятый для слоя окатышей $\Phi = 1$.

D – коэффициент диффузии кислорода в воздухе, рассчитываемый по эмпирической формуле.

Коэффициент массообмена рассчитывается как:

$$k_{gO_2} = \frac{Sh \cdot D}{d_{ок}}, \text{ м/с} \quad (10)$$

Коэффициент диффузии кислорода в окатыше определяется с учетом пористости окатыша:

$$D_{O_2} = \frac{D \cdot \varepsilon_1}{\chi} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (11)$$

где χ – коэффициент извилистости пор окатыша.

В результате реакции окисления в единице объема слоя окатышей будет выделяться количество теплоты:

$$Q_1 = q_1 \cdot V(\tau) \cdot N_1 \text{ Вт/м}^3, \quad (12)$$

где q_1 – теплота реакции окисления магнетита, Дж/кг Fe_3O_4 ; N_1 – число окатышей в единице объема слоя.

Степень окисления окатышей определяется как:

$$\Psi_{Fe_3O_4}(\tau) = 1 - \left[\frac{r_m(\tau)}{r_{ок}} \right]^3 \quad (13)$$

Для описания процесса диссоциации известняка применяется модель, в которой принято, что реакция разложения $CaCO_3$ начинается с поверхности куска известняка и протекает по направлению к его центру таким образом, что в любой момент времени этого процесса имеет место неразложившееся ядро и внешняя область, содержащая CaO (физически процесс диссоциации рассматривается аналогично процессу окисления магнетита). Используется допущение, что процесс диссоциации $CaCO_3$ в окатыше протекает так же, как и в куске чистого известняка, но с учетом его массовой доли p_2 . Таким образом, скорость реакции известняка определяется по уравнению:

$$V_{\text{CaCO}_3} = \frac{4\pi r_{\text{ок}}^2 (c_{\text{CO}_2}^{\text{равн}} - c_{\text{CO}_2})}{\frac{1}{k_{\text{CO}_2}} + \left[\frac{r_{\text{ок}}}{r_1(\tau)} \right]^2 \frac{K_1}{k_1 R_o T_{\text{ок}}} + \frac{r_{\text{ок}} [r_{\text{ок}} - r_1(\tau)]}{r_1(\tau) D_{\text{CO}_2}}} \quad (14)$$

где V_{CaCO_3} – скорость реакции разложения известняка, моль/с;
 $c_{\text{CO}_2}^{\text{равн}}$ – равновесная объемная концентрация CO_2 , моль/м³; c_{CO_2} –
 объемная концентрация CO_2 на поверхности окатыша, моль/м³; k_{CO_2} –
 коэффициент массопереноса CO_2 на поверхности окатыша, м/с; $r_1(\tau)$ –
 радиус ядра, содержащего неразложившийся известняк в момент
 времени τ , м; K_1 – константа реакции разложения известняка, С⁻¹;
 k_1 – скорость химической реакции разложения известняка, м/с; D_{CO_2} –
 коэффициент диффузии CO_2 в воздухе, м²/с.

В уравнении (14) удобнее перейти от концентраций CO_2 к
 соответствующим давлениям. Тогда скорость реакции известняка
 будет определяться выражением:

$$V_{\text{CaCO}_3} = \frac{4\pi r_{\text{ок}}^2 (p_{\text{CO}_2}^{\text{равн}} - p_{\text{CO}_2})}{R_o T_{\text{ок}} \left\{ \frac{1}{k_{\text{CO}_2}} + \left[\frac{r_{\text{ок}}}{r_1(\tau)} \right]^2 \frac{K_1}{k_1 R_o T_{\text{ок}}} + \frac{r_{\text{ок}} [r_{\text{ок}} - r_1(\tau)]}{r_1(\tau) D_{\text{CO}_2}} \right\}} \quad (15)$$

Перемещение границы реакции определяется:

$$\frac{dr_1(\tau)}{d\tau} = - \frac{V_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{CaCO}_3}}{4\pi r_1^2(\tau) \rho_{\text{ок}} (1 - \varepsilon_1) p_2}, \quad (16)$$

где M_{CaCO_3} – молекулярная масса CaCO_3 .

В результате разложения известняка поглощается следующее
 количество теплоты:

$$Q_2 = q_2 \cdot V_{\text{CaCO}_3} \cdot N_1, \quad (17)$$

где q_2 – теплота диссоциации CaCO_3 , Дж/кг CaCO_3 .

Константу реакции разложения известняка определяем как

$$K_1 = 10^5 \cdot \exp \left(\frac{-5211}{T_{\text{ок}}} + 7,35 \right) \quad (18)$$

Скорость химической реакции разложения известняка:

$$k_1 = \frac{91,2}{60} \cdot \exp \left[\frac{-40000}{82,05 \cdot T_{\text{ок}}} \right] \quad (19)$$

Коэффициент диффузии CO_2 (D_{CO_2}) принимаем равным
 коэффициенту диффузии кислорода D_{O_2} , определение которого было
 рассмотрено выше.

Степень диссоциации известняка в окатыше в процессе обжига рассчитывается по формуле:

$$\Psi_{\text{CaCO}_3}(\tau) = 1 - \left[\frac{r_1(\tau)}{r_{\text{ок}}} \right]^3 \quad (20)$$

Для описания окисления углерода, при моделировании процесса обжига углеродсодержащих окатышей принимаем, что углерод окисляется по реакции $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$. Тогда скорость выделения теплоты в единице объема окатышей будет иметь следующее выражение:

$$Q_3 = q_3 \cdot N_1 \cdot \frac{dm_c}{d\tau} \quad (21)$$

В реальных условиях обжига окатышей с добавками твердого топлива, горение углерода твердого топлива происходит в кинетическом режиме и во всем объеме. Тогда уравнение скорости химической реакции для данного процесса будет иметь вид:

$$V_{x.p.} = k_{x.p.} \cdot c_{\text{O}_2} \cdot S_c \quad (22)$$

где

$$k_{x.p.} = k_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (23)$$

Скорость химической реакции определяется по эмпирическому уравнению и зависит от температуры следующим образом:

$$k_c = \frac{1,39}{60} \cdot 10^5 \cdot \exp\left(\frac{-38196}{1,987 \cdot T_{\text{ок}}}\right) \quad (24)$$

k_c – константа скорости реакции, с^{-1} ;

c_{O_2} – концентрация кислорода в частице твердого топлива;

S_c – поверхность частички углерода, м^2 ;

Принимаем, что частицы твердого топлива имеют шарообразную форму, тогда скорость горения частички углерода будет описываться уравнением:

$$V_c = k_c \cdot c_{\text{O}_2} \cdot K_1 \cdot m_c^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

Для оценки завершенности процесса обжига и качества окатышей был использован интегральный температурно-временной показатель [7]:

$$\sum t\tau = \int_0^{\tau_3} [t_{\text{ок}}(\tau) - t_0] d\tau, \quad (26)$$

где t_0 – температура начала твердофазного спекания.

С помощью разработанной математической модели рассчитывали процессы обжига окатышей комбинированным топливом при различном содержании углерода (от 0,1 до 1%) и постоянной высоте слоя окатышей равной 400 мм, начальном содержании влаги в окатышах 10 %, содержании известняка 7 %, содержании бентонита 2% и содержании концентрата 91 %. Полученные результаты распределения температур и степени окисления углерода графически представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Видно, что с увеличением содержания углерода в окатышах нагрев слоя принимает вид тепловой волны. С увеличением содержания углерода максимум температур слоя располагается на более низких горизонтах слоя и заметно, что при содержании углерода более 0,5 % наблюдается зона охлаждения в верхней части слоя (рисунок 1). При увеличении количества углерода в слое его окисление происходит менее равномерно по высоте слоя (рисунок 2), высота зоны интенсивного горения сокращается.

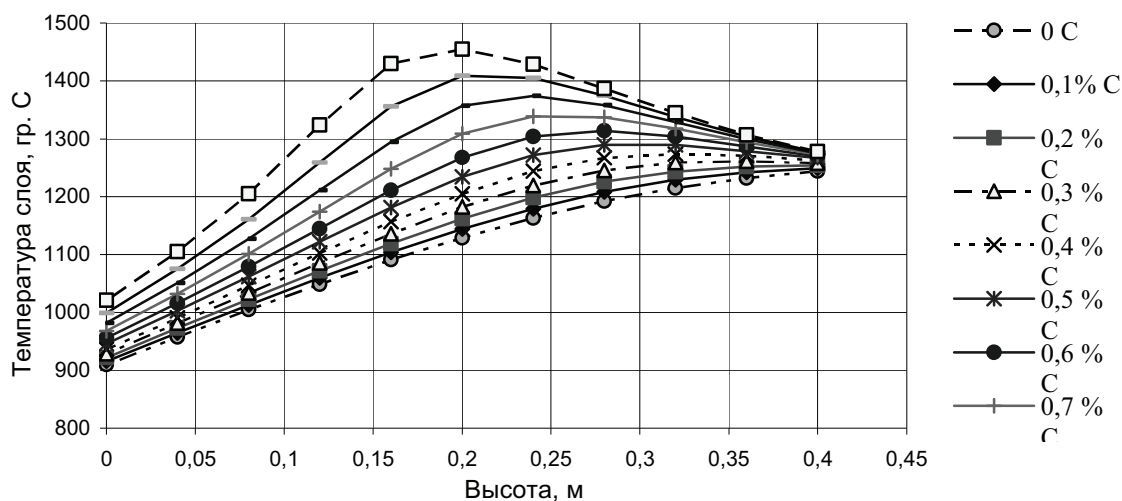


Рисунок 1 - Распределение температур окатышей по высоте слоя в зависимости от содержания углерода (конец зоны обжига)

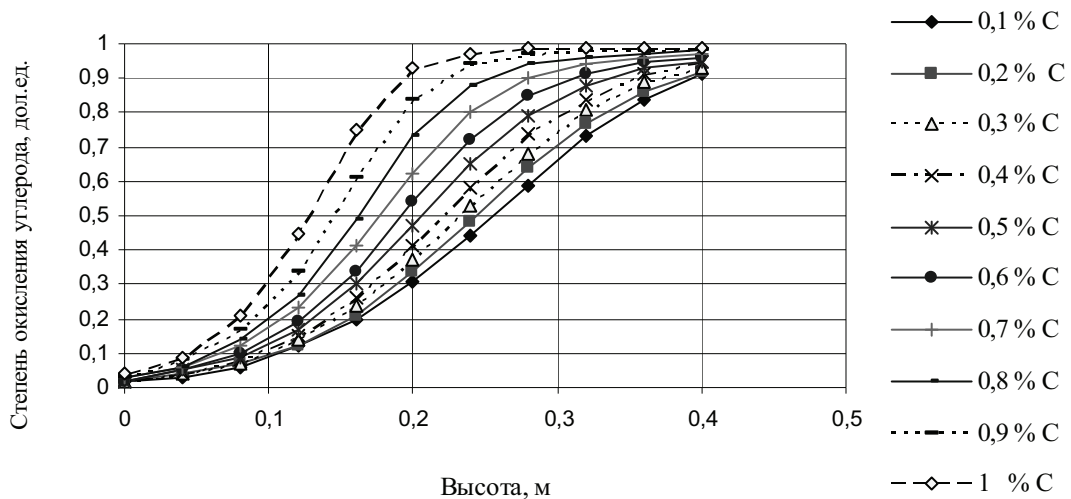


Рисунок 2 - Изменение степени окисления углерода по высоте слоя в зависимости от содержания углерода в окатышах (конец зоны обжига)

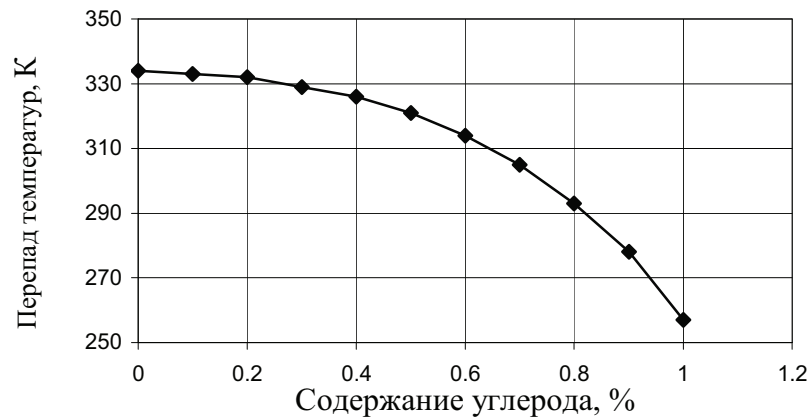


Рисунок 3 - Зависимость перепада температур в слое от содержания углерода в окатышах

На рисунке 3 показано изменение разности температур окатышей верха и низа слоя в зависимости от содержания углерода в зоне обжига. Добавление твёрдого топлива в шихту может значительно сократить перепад температур по высоте слоя, что в свою очередь позволит повысить время пребывания нижней части слоя при температурах, достаточных для процессов упрочнения и как следствие улучшит показатели прочности этих окатышей.

При добавлении более 0,7 % углерода наблюдается значительный перегрев окатышей (рисунок 1). Для предотвращения этого необходимо снижение температур теплоносителя в горне зоны обжига на 100 – 150 о С. Углерод в нижней части слоя не успеет полностью окислиться за время пребывания в зоне обжига, и часть его будет догорать в зоне охлаждения, повышая температуру газа на выходе из

слоя. Это в свою очередь так же позволит снизить расход газообразного топлива при формировании газа – теплоносителя в зоне обжига.

Выводы

Разработана динамическая математическая модель слоевого окислительного обжига углеродсодержащих железорудных окатышей на конвейерной машине. Модель позволяет рассчитать влияние характеристик отдельных окатышей и слоя на показатели процесса обжига и качество обожженных окатышей. К ним относятся содержание известняка, магнетита, твердого топлива, а также скорости фильтрации и температуры теплоносителя, содержание в нем кислорода, скорость движения тележек обжиговой машины, высота слоя и его порозность, размер окатышей, их плотность и др.

С помощью математической модели исследованы закономерности обжига железорудных окатышей с использованием комбинированного топлива на конвейерной машине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.М. Майзель, А.А. Буткарев. Промышленное применение математических моделей для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине. // сб.: "Теплотехника процессов подготовки металлургического сырья". – Екатеринбург. – 2000. –С. 24.
2. Юсфин Ю.С., Каменев А.Д., Буткарев А.П. Управление окускованием железорудных материалов. – М.: Металлургия. – 1990.
3. Thurlby J.A., Batterman R.I., Measurement and prediction of drying rates and spalling behaviour of hematite pellets. // Transactions Institute Mineral. – Section C. – 1980. – v. 89. – P. 125 – 131.
4. Young R.W., Cross M., Gibson R.D. Mathematical model of grate – kiln – cooler process used for induration of iron ore pellets. // Ironmaking and Steelmaking. – 1979. – N 1. – P. 1 – 13.
5. Thurlby I.A., Batterham R.I., Yurner R.E. Development and validation of a mathematical model for the moving grate induration of iron ore pellets. – / International Journal Mineral Processing. – 1979. – N 6. – P. 43 – 64.
6. Теорія металургійних процесів. / В.Б. Окоцький, О.Л. Костьолов, В.К. Сімонов та ін. // Київ. – 1997.
7. Henning M., Lehmkuhler H. J. Thermische Aufbereitung metallhaltiger Huttenrest stoffe mit Hilfe des Inmetco-Direktreduktions verfahrens // Informations schrift. – 1988. – N 39. – S. 139 – 156.

Получено 21.12.2007 г.