

*Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев*

Уральский федеральный университет

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАРБОНАТНОЙ СИДЕРИТОВОЙ РУДЫ И АГЛОМЕРАТОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

**Аннотация.** С использованием метода смешения найдена зависимость изменения энтальпии образцов сидеритовой руды и агломератов на ее основе от температуры. Составлены уравнения, отображающие эту зависимость для энтальпии, истинной и средней теплоемкостей. В процессе монотонного нагрева образцов цилиндрической формы проведено измерение коэффициента температуропроводности как для сырой, так и обожженной сидеритовой руды. По результатам измерения теплоемкости, плотности и коэффициента температуропроводности определена зависимость коэффициента теплопроводности сидеритовой руды от температуры. Полученные данные могут быть использованы для составления тепловых балансов отдельных зон шахтной печи для обжига сидеритовой руды и определения оптимального расхода твердого топлива при агломерации.

**Ключевые слова:** сидеритовая руда, агломерат, температура, энтальпия, теплоемкость, плотность, коэффициент температуропроводности, коэффициент теплопроводности, шахтная печь, параметры, тепловой агрегат, термообработка.

## STUDYING OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CARBONATE SIDERITE ORE AND AGGLOMERATES ON ITS BASIS

**Abstract.** By using the method of mixing the dependence of changing of enthalpy of specimen of siderite ore and agglomerates on temperature was found. The interpolational equations were formed on the basis of the received data, they represent that dependence for enthalpy, original and average heat capacity in broad interval of temperatures. The possibility of application of the method of additive calculation for determination of heat capacity and enthalpy of agglomerates and ore with sufficient exactness for engineering practice was defined. According to the results of measuring heat capacity, density and coefficient of temperature conductivity, the dependence of the coefficient of temperature conductivity of siderite ore on temperature was defined. The received data permit forming the thermal balances of separate zones of shaft-furnace for roasting siderite ore and basing the optimum value of the consumption of solid fuel at agglomeration and also optimizing constructive and operating parameters of the work of thermal aggregates designed for heat treatment of siderite ore and receiving agglomerates.

**Keywords:** siderite ore, agglomerate, temperature, enthalpy, heat capacity, density, coefficient of temperature conductivity, coefficient of heat conductivity, shaft-furnace, parameter, thermal aggregates, heat treatment.

Спекание агломерационной шихты, как и обжиг сидеритовой руды в шахтных печах сопровождается протеканием сложных физико-химических и теплофизических процессов в широком интервале температур. Причем на отдельных стадиях нагрева требуются значительно различающиеся между собой потоки тепловой энергии, обеспечивающие протекание данного процесса с нужной скоростью. Протекание этих процессов осложняется процессами разложения карбонатов, окисления и восстановления оксидов железа, магнезия и марганца, горения топлива, образованием пористости и т.д. Все эти процессы вызывают непрерывное изменение эффективных теплофизических характеристик материала (теплоемкости, температуро- и теплопроводности). Эффективные теплофизические характеристики в значительной степени зависят от скорости нагрева и охлаждения материала, размера и формы кусков, скорости фильтрации и т. п. Поэтому успешное решение задачи отработки оптимальной технологии спекания шихт, содержащих сидеритовую руду, а также эффективного обжига в шахтных печах не может быть решено без наличия данных о теплофизических свойствах

агломератов и сидеритовой руды, используемой для их производства.

В данной работе наиболее детально изучена теплоемкость агломератов и сидеритовой руды, а также весь набор теплофизических свойств сидеритовой руды.

Среднюю теплоемкость материалов изучали на установке с адиабатическим калориметром Скуратова [1]. Опытные данные по теплоемкости  $C_p$  аппроксимировали формулой [2]

$$C_p = a + bT + c/T^2, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, определяемые расчетным путем при обработке экспериментальных данных;  $T$  – абсолютная температура, К.

Среднюю теплоемкость  $\bar{C}_p$  на интервале  $T_0 - T$  находили из выражения [3]:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T C_p dT. \quad (2)$$

С учетом (1) получим:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T - T_o} \left( aT + b \frac{1}{2} T^2 + c \frac{1}{T} \right) \Big|_{T_o}^T =$$

$$= \frac{1}{T - T_o} \left[ a(T - T_o) + \frac{b}{2} (T^2 - T_o^2) + C \left( \frac{T_o - T}{T_o T} \right) \right].$$

Отсюда следует, что

$$\bar{C}_p = \left( a + \frac{b}{2} T_o \right) - \frac{b}{2} T - \frac{c/T_o}{T} = \alpha + \beta T - \frac{\gamma}{T}, \quad (3)$$

где  $\alpha = a + \frac{b}{2} T_o$ ;  $\beta = \frac{b}{2}$ ;  $\gamma = \frac{c}{T_o}$ .

Приращение энтальпии на интервале  $T_o - T$  равно:

$$\Delta H = \int_{T_o}^T C_p dT. \quad (4)$$

С учетом (1) будем иметь:

$$\Delta H = \left( aT + \frac{b}{2} T^2 + \frac{c}{T} \right) \Big|_{T_o}^T = a(T - T_o) + \frac{b}{2} (T^2 - T_o^2) +$$

$$+ C \left( \frac{T_o - T}{T_o T} \right) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + \frac{A_4}{T}, \quad (5)$$

где  $A_1 = -aT_o - \frac{b}{2} T_o^2 - \frac{c}{T_o}$ ;  $A_2 = a$ ;  $A_3 = \frac{b}{2}$ ;  $A_4 = C$ .

Если выразить коэффициенты  $a, b, c$  и  $\alpha, \beta, \gamma$  через  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , то из выражения (5) сначала получим  $a = A_2, b = 2A_3, c = A_4$ , а затем из выражения (3) будем иметь:

$$\alpha = a + \frac{b}{2} T_o = A_2 + A_3 T_o; \beta = \frac{b}{2} = A_3; \gamma = \frac{c}{T_o} = \frac{A_4}{T_o},$$

где  $T_o = 298,15$  К.

Тогда зависимость изменения величин  $\Delta H_{298}^T, C_p$  и  $\bar{C}_p$  в интервале температур от 298 до  $T$  можно описать уравнениями (с использованием метода наименьших квадратов).

Для образцов из агломерата, имеющих следующий химический состав, % (по массе): 44,70 Fe; 12,30 FeO; 10,20 CaO; 10,60 MgO; 3,50 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10,00 SiO<sub>2</sub>; 1,34 MnO; 0,036 S<sub>общ</sub>; 0,30 C<sub>тв</sub>; 0,027 P; 0,34 ПМПП:

$$\Delta H_{298}^T = 214,8 + 4,628 \cdot 10^{-3} T + 4,756 \cdot 10^{-4} T^2 - 6,783 \cdot 10^4 / T;$$

$$C_p = 4,628 \cdot 10^{-3} + 9,512 \cdot 10^{-4} T + 6,783 \cdot 10^4 / T;$$

$$\bar{C}_p = 0,146 + 4,756 \cdot 10^{-4} T - 227,5 / T.$$

Для образцов из агломерата, имеющих следующий химический состав, % (по массе): 42,70 Fe; 15,00 FeO;

11,30 CaO; 10,00 MgO; 3,80 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 11,50 SiO<sub>2</sub>; 1,32 MnO; 0,030 S<sub>общ</sub>; 0,14 C<sub>тв</sub>; 0,030 P; 0,30 ПМПП:

$$\Delta H_{298}^T = 319,1 + 0,183 T + 5,665 \cdot 10^{-4} T^2 - 8,574 \cdot 10^4 / T;$$

$$C_p = -0,183 + 1,133 \cdot 10^{-3} + 8,874 \cdot 10^4 / T;$$

$$\bar{C}_p = -1,4 \cdot 10^{-2} - 5,665 \cdot 10^{-4} T + 287,6 / T.$$

Для образцов из агломерата, имеющих следующий химический состав, % (по массе): 43,70 Fe; 16,90 FeO; 10,00 CaO; 12,30 MgO; 3,90 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10,20 SiO<sub>2</sub>; 1,70 MnO; 0,04 S<sub>общ</sub>; 0,26 C<sub>тв</sub>; 0,028 P; 0,26 ПМПП:

$$\Delta H_{298}^T = 257,3 - 3,94 T \cdot 10^{-2} + 4,939 \cdot 10^{-4} T^2 - 8,101 \cdot 10^4 / T;$$

$$C_p = -3,94 \cdot 10^{-2} + 9,878 \cdot 10^{-4} + 8,101 \cdot 10^4 / T^2;$$

$$\bar{C}_p = 0,108 + 4,939 \cdot 10^{-4} T + 271,7 / T.$$

Для образцов из агломерата, имеющих следующий химический состав, % (по массе): 43,00 Fe; 18,00 FeO; 10,60 CaO; 10,70 MgO; 4,00 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10,00 SiO<sub>2</sub>; 1,50 MnO; 0,03 S<sub>общ</sub>; 0,32 C<sub>тв</sub>; 0,034 P; 0,29 ПМПП:

$$\Delta H_{298}^T = 285,0 - 0,104 T + 5,234 \cdot 10^{-4} T^2 - 7,902 \cdot 10^4 / T;$$

$$C_p = -0,104 + 1,047 \cdot 10^{-3} + 7,902 \cdot 10^4 / T^2;$$

$$\bar{C}_p = 0,052 + 5,234 \cdot 10^{-4} T + 256,0 / T.$$

Для образцов из агломерата, имеющих следующий химический состав, % (по массе): 40,67 Fe; 50,72 FeO; 0,37 CaO; 6,8 MgO; 0,16 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,64 SiO<sub>2</sub>; 1,65 MnO; 0,008 S<sub>общ</sub>; 38,80 ПМПП:

$$\Delta H_{298}^T = -236,0 + 0,89 T + 1,8 \cdot 10^{-5} T^2 - 8,25 \cdot 10^3 / T;$$

$$C_p = 0,89 + 3,6 \cdot 10^{-5} + 8,25 \cdot 10^3 / T^2;$$

$$\bar{C}_p = 0,895 + 1,8 \cdot 10^{-5} T - 27,7 / T.$$

Для образцов из сидеритовой руды, предварительно обожженных при температуре 1200 °С в течение 60 мин, % (по массе): 53,28 Fe; 0,84 FeO; 75,25 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

$$\Delta H_{298}^T = 181,7 + 0,748 T + 9,682 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,489 \cdot 10^4 / T;$$

$$C_p = 0,748 + 1,936 \cdot 10^{-4} T + 1,489 \cdot 10^4 / T^2;$$

$$\bar{C}_p = 0,777 + 9,682 \cdot 10^{-5} T + 49,9 / T.$$

Для образцов из сидеритовой руды при их выдержке при температуре испытания 1 мин, % (по массе): 38,30 Fe; 47,64 FeO; 1,82 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (при температурах 1300 и 1350 °С образцы нагревались в атмосфере гелия):

$$\Delta H_{298}^T = -617,2 + 1,474T - 2,337 \cdot 10^{-4}T^2 - 5,961 \cdot 10^4/T;$$

$$C_p = 1,474 + 4,674 \cdot 10^{-4}T - 5,961 \cdot 10^4/T^2;$$

$$\bar{C}_p = 1,404 - 2,337 \cdot 10^{-4}T - 199,9/T.$$

Для образцов из сидеритовой руды при их выдержке при температуре испытания 60 мин, % (по массе): 39,31 Fe; 46,34 FeO; 4,70 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (при температурах 1300 и 1350 °С образцы нагревались в атмосфере гелия):

$$\Delta H_{298}^T = -1438 + 2,558T - 6,531 \cdot 10^{-4}T^2 + 2,196 \cdot 10^5/T;$$

$$C_p = 2,558 - 1,306 \cdot 10^{-3}T - 2,196 \cdot 10^5/T^2;$$

$$\bar{C}_p = 2,363 - 6,531 \cdot 10^{-4}T - 736,5/T.$$

В работе ставилась также задача установить возможность применения метода аддитивного расчета теплоемкости сидеритовых руд для практических целей. Использование этого метода обычно позволяет проводить расчеты теплоемкости материалов с точностью не ниже ±10 %. Экспериментальное определение энтальпии с точностью ±1,0 % может привести при дифференцировании к ошибкам 20 – 30 %.

При расчете теплоемкости сидеритовой руды химический состав ее изменялся в следующих пределах, % (по массе): 34 – 37 Fe; 0,4 – 11,5 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 35 – 45 FeO; 5 – 13 MgO; 0,6 – 2,6 CaO; 0,6 – 2,2 MnO; 0,5 – 10,3 SiO<sub>2</sub>; 0,2 – 2,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, остальное прочие и ПМПП. Принимали, что железо, магний и кальций входят в состав руды в виде карбонатов FeCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, а алюминий, кремний, марганец – в виде оксидов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> и MnO. После разложения карбонатов железо, магний и кальций переходят в оксиды Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO (применительно к условиям нагрева в окислительной среде). Температурные интервалы разложения карбонатов приняты следующие: 520 – 580 °С для FeCO<sub>3</sub>; 610 – 640 °С для MgCO<sub>3</sub>; 890 – 940 °С для CaCO<sub>3</sub> [4]. Теплоемкость рассчитывали по формуле [5]

$$C = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n C_i x_i,$$

где  $C_i$  – удельная теплоемкость компонента, кДж/(кг·К);  $x_i$  – содержание компонента в руде, %;  $n$  – число компонентов в составе руды.

Зависимость физической теплоемкости от температуры (рис. 1, кривая 1) рассчитана для руды следующего химического состава, % (по массе): 33,98 Fe; 40,6 FeO; 3,47 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 9,32 MgO; 1,27 CaO; 1,39 MnO; 8,94 SiO<sub>2</sub>; 1,30 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Энтальпию сидеритовой руды измеряли на установке с адиабатическим калориметром. Результаты измерения приведены на рис. 1, из которого видно, что максимальное расхождение расчетных (кривая 3) и

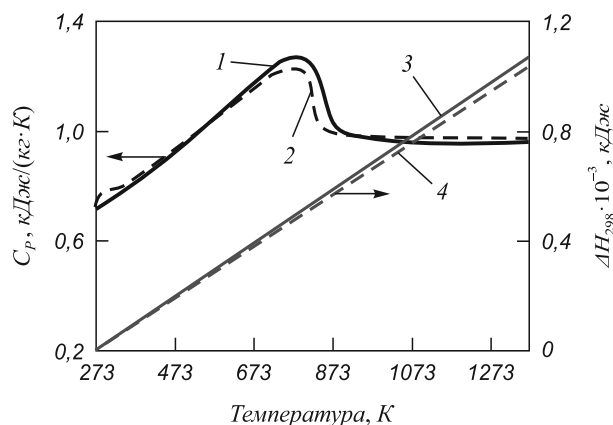


Рис. 1. Зависимость теплоемкости (1, 2) и энтальпии (3, 4) сидеритовой руды от температуры: — по расчету; - - - по опытным данным

опытных (кривая 4) данных не превышает ±10 %. При дифференцировании экспериментальной зависимости энтальпии руды от температуры  $\Delta H_{298}^T = f(T)$  получена кривая 2 физической теплоемкости руды. Существенное расхождение кривых 1 и 2 в диапазоне температур 773 – 873 К можно объяснить некоторым несоответствием температурных интервалов разложения сидеритовой руды, принятых при расчете и имевших место в эксперименте. При температурах 273 – 773 и 873 – 1373 К расхождение расчетных и опытных результатов определения теплоемкости незначительно (менее ±5 %). Следовательно, теплоемкость и энтальпия сидеритовых руд могут определяться расчетом (по методу аддитивности) с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Измерение коэффициента температуропроводности проводилось на трех образцах цилиндрической формы радиуса  $R$  в процессе их монотонного нагрева на установке, описанной в работе [6]. Химический состав образцов был такой же, как и для определения физической теплоемкости (см. выше). Длина образца принималась не менее  $6R$ , что позволяло, без большой погрешности, считать их бесконечными цилиндрами [7]. Температуру отдельного образца контролировали в трех точках поперечного сечения на расстояниях  $0; 0,707R; \sim 0,9R$  от оси образца. Кривую зависимости температуры от времени на воображаемой цилиндрической поверхности (радиусом  $R_1 = 0,707$  или  $R_1 = 0,9R$ ) аппроксимировали ломанной линией. Затем с помощью ЭВМ решали уравнение теплопроводности, описывающее распределение температур в бесконечном цилиндре относительно коэффициентов температуропроводности  $a_1$  или  $a_2$  (в соответствии с  $R_1$  или  $R_2$ ). Специально тестами установлено, что методическая ошибка такого расчета коэффициентов температуропроводности практически равна нулю.

Чтобы выявить зависимость коэффициента температуропроводности от температуры как для сырой руды, так и для обожженной, каждый образец руды нагревали три раза. Охлаждались образцы вместе с печью со

скоростью 0,1 – 0,2 °С/с. Отклонение опытных данных от средних значений составляло ±10 %. Усредненные результаты определения коэффициента температуропроводности приведены на рис. 2. Из анализа кривой 1 видно, что при нагреве руды до 773 К в ней не происходит значительных термохимических превращений. Причем величина эффективного (кажущегося) коэффициента температуропроводности здесь слабо зависит от скорости нагрева. В интервале 753 – 793 К начинается интенсивное разложение карбонатов железа и магния, сопровождающееся поглощением большого количества теплоты. Это вызывает резкое уменьшение коэффициента температуропроводности. После окончания процесса разложения карбонатов коэффициент температуропроводности снова возрастает, оставаясь примерно постоянным. Процессы окисления низких оксидов железа при первом нагреве практически не отразились на его величине из-за наличия в объеме печи избыточного давления диоксида углерода. Разложение карбонатов кальция при температурах выше 1173 К также мало сказалось на изменении коэффициента температуропроводности из-за небольшого содержания их в исходной руде.

Вторичный нагрев сидеритовой руды проведен для всех образцов со скоростью 0,10 – 0,15 °С/с. Характерный для всех трех образцов «горб» (рис. 2, кривая 2) указывает на протекание в образцах термохимических превращений в зоне температур 723 – 1073 К с выделением теплоты, что связано с доокислением низких оксидов железа.

При третьем нагреве коэффициент температуропроводности монотонно уменьшается с ростом температуры (рис. 2, кривая 3), занимая промежуточные значения между величинами коэффициентов температуропроводности руды при первом и втором нагревах (при температурах до 773 К). При высоких температурах кривая 3 проходит несколько выше кривых 1 и 2, что объясняется более высокой плотностью образцов.

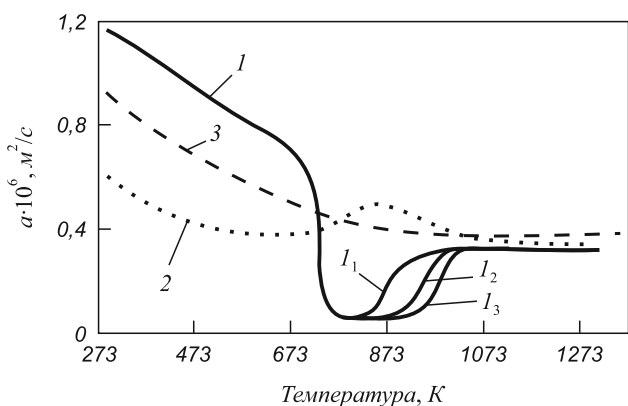


Рис. 2. Усредненные результаты определения коэффициентов температуропроводности сидеритовой руды (по образцам 1, 2, 3 и коэффициентам температуропроводности  $a_1, a_2$ ): 1, 2, 3 – соответственно при первом, втором, третьем нагревах;  $I_1, I_2, I_3$  – для образцов 1, 2, 3 при первом нагреве

Плотность сидеритовой руды определялась путем совместной обработки результатов гравиметрического и dilatометрического исследований образцов сырой сидеритовой руды. Гравиметрия образцов производилась на дериватографе типа «Паулин, Паулин-Эрдем». Dilатометрические измерения образцов с начальной длиной 25 мм проводились на том же дериватографе, оборудованном специальной приставкой. Все опыты проходили в условиях инертной (гелий) и окислительной (воздух) атмосферы при скоростях нагрева 4 и 10 °С/мин.

Зависимость плотности руды от температуры рассчитывалась по формуле

$$\rho = \frac{\rho_o \left( 1 + \frac{\Delta G}{G_o} \right)}{1 + \frac{\Delta V}{V_o}},$$

где  $\rho_o$  – плотность сидеритовой руды при температуре 293 К ( $\rho_o = 3,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);  $\Delta G/G_o$  – относительное изменение массы;  $\Delta V/V_o$  – относительное изменение объема.

Результаты расчета плотности приведены на рис. 3, из которого видно, что при разложении карбонатов железа и магния плотность сидеритовой руды уменьшается почти в 1,5 раза. При дальнейшем нагреве примерно до 1373 К плотность руды изменяется слабо.

Коэффициент теплопроводности сидеритовой руды определяли, используя известное соотношение

$$\lambda = a c \rho$$

и определенные величины коэффициентов температуропроводности, теплоемкости и плотности. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры приведена на рис. 4.

Для определения количественных затрат теплоты на разложение карбонатов железа и магния (сумма этих карбонатов в сидеритовой руде составляет 85 – 95 %) требуются данные по величине теплового эффекта этой

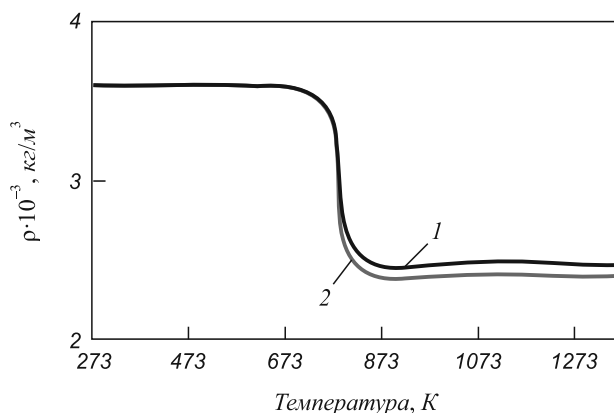


Рис. 3. Зависимость плотности сидеритовой руды от температуры: 1 – в инертной среде; 2 – в окислительной среде

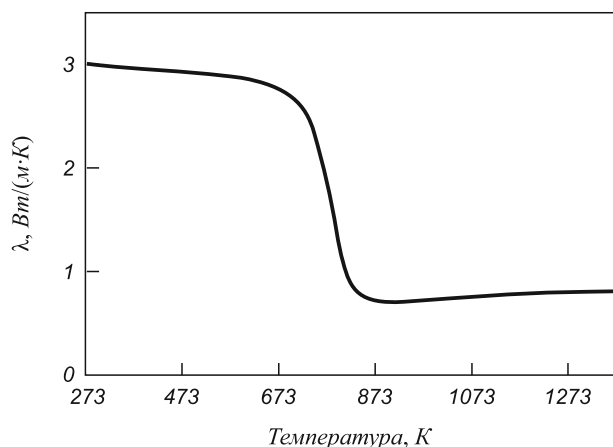


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности сидеритовой руды от температуры

реакции. Это необходимо для рационального распределения тепловых потоков по различным зонам шахтной печи при обработке оптимального режима обжига сидеритовых руд. Гравиметрическими исследованиями установлено, что разложение карбонатов железа и магния протекает как единый процесс и раздельно с процессом окисления низких оксидов железа. Поэтому представляется возможным определение эквивалентной теплоты разложения  $q$  карбонатов железа и магния на основе приближенного решения задачи о фазовом превращении [8] (более точное решение задачи приведено в работе [9]), откуда

$$q = \frac{4\lambda_2 \Delta T}{\rho_1 R^2} \frac{\tau_\phi}{1 + \Delta},$$

где  $\Delta = \frac{C_2 \rho}{q \rho_1} \Delta T$  – поправка А.А. Померанцева ( $C_2, \rho_2, \lambda_2$  – теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности сидеритовой руды после разложения карбонатов железа и магния);  $\Delta T$  – разность температур на поверхности и оси образца;  $\tau_\phi$  – время разложения карбонатов;  $R$  – радиус образца;  $\rho_1$  – плотность сырой руды.

Из термограммы нагрева образца радиусом 22 мм найдено, что  $\Delta T \approx 58$  К. Время фазового превращения  $\tau_\phi \approx 10\,500$  с. По соответствующим графикам найдено, что  $\rho_1 = 3,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2 = 2,35 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_2 = 0,98$  кДж/(кг·К);  $a_2 = 0,29 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с ( $a_2 = \lambda_2 / c_2 \rho_2$ ). Без учета поправки  $\Delta$  имеем:

$$q_1 = \frac{4 \cdot 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 0,97 \cdot 10^3 \cdot 2,35 \cdot 10^3}{3,56 \cdot 10^3 \cdot (22)^2 \cdot 10^{-6}} \cdot 58 \cdot 10\,500 = 934,6 \text{ кДж/кг сырой руды.}$$

Поправка равна  $\Delta = \frac{0,97 \cdot 2,36 \cdot 10^3}{934,6 \cdot 3,56 \cdot 10^3} \cdot 58 = 0,0397$ . С учетом поправки получим:

$$q = \frac{q_1}{1 + \Delta} = \frac{934,6}{1,0397} = 898,9 \text{ кДж/кг сырой руды.}$$

**Выводы.** Найдены зависимости энтальпии, испытанной и средней теплоемкости образцов сидеритовой руды и агломератов от температуры. Показана возможность применения метода аддитивного расчета для определения энтальпии и теплоемкости железорудных материалов. По результатам измерения теплоемкости, плотности и коэффициентов температуропроводности рассчитаны коэффициенты теплопроводности сидеритовой руды. Полученные данные по теплофизическим свойствам сидеритовых руд и агломератов могут быть использованы при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы тепловых установок, предназначенных для термической обработки материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. Ч. 2. – М.: МГУ, 1966. – 434 с.
2. Юрьев Б.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 12. С. 63 – 67.
3. Юрьев Б.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 49 – 53.
4. Есин О.Д., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. – Свердловск: Metallurgizdat, 1962. – 670 с.
5. Краткий справочник физико-химических величин / Н.М. Барон, Э.И. Квят, Е.А. Подгорная и др. – Л.: Химия, 1974. – 200 с.
6. Абзалов В.М., Юрьев Б.П., Братчиков С.Г. // Металлы. 1976. № 6. С. 10 – 17.
7. Юрьев Б.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 26 – 28.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 5, 99 с.
9. Юрьев Б.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 3. С. 61 – 64.

© 2013 г. Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев  
Поступила 26 июня 2013 г.