

УДК 669.2/8:622.788

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КАЧКАНАРСКИХ ОКАТЫШЕЙ*

Юрьев Б.П., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика
и информатика в металлургии» (yurev-b@mail.ru)

Гольцев В.А., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика
и информатика в металлургии» (v.a.goltsev@urfu.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Определены теплофизические свойства титаномagnetитовых качканарских окатышей различной основности. С применением метода смешения найдена зависимость средней физической теплоемкости окатышей от температуры и фазового состава. Для нахождения кажущейся теплоемкости окатышей использована гравиметрическая установка с непрерывной регистрацией изменения массы окатыша, обеспечивающая создание окислительной или нейтральной атмосферы с целью разделения процессов окисления и декарбонизации. Определены коэффициенты температуропроводности окатышей с применением квазистационарного метода, позволяющего в режиме непрерывного нагревания использовать простые расчетные соотношения. Коэффициенты теплопроводности окатышей найдены из уравнения, связывающего их плотность, теплоемкость и коэффициенты температуропроводности. Полученные результаты представляют определенный интерес и могут быть использованы при проектировании новых обжиговых агрегатов, а также при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы существующих.

Ключевые слова: титаномagnetитовые окатыши, энтальпия, теплоемкость, плотность, коэффициенты температуро- и теплопроводности, основность, окисление, диссоциация, обжиговые агрегаты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-328-333

Для проведения инженерных расчетов, связанных с проектированием новых обжиговых установок, а также с оптимизацией конструктивных и режимных параметров работы существующих, требуется знание теплофизических характеристик материалов, подвергаемых тепловой обработке, а также изменение этих характеристик в процессе обжига в широком интервале температур. Эти характеристики также необходимы в расчетах по тепло- и массообмену в слое железорудных окатышей, подвергаемых окислительному обжигу. Однако в значительной мере не только новые, но и даже известные методы расчета параметров процессов не могут быть применены из-за отсутствия достаточно надежных данных о теплофизических свойствах.

Целью данной работы являлось определение теплофизических характеристик титаномagnetитовых окатышей Качканарского ГОКа в процессе нагрева в широком диапазоне измерения температур.

Среднюю физическую теплоемкость окатышей изучали методом смешения, который в настоящее время является весьма распространенным [1 – 7] по сравнению с другими методами [8 – 10], на установке с адиабатическим калориметром системы Скуратова [1]. Исходный химический состав исследуемых окатышей приведен в таблице.

Образцы железорудных окатышей массой 4 – 5 г помещали в ампулу из жаростойкого металлического сплава, нагревали в трубчатой печи сопротивления, давали выдержку для выравнивания температурного поля, а затем сбрасывали в теплоприемник калориметра. С целью получения зависимости средней физической теплоемкости не только от температуры, но и от фазового состава, изменяющегося при нагреве в связи с протеканием в окатышах физико-химических процессов, в крышке ампулы были сделаны отверстия для доступа кислорода воздуха к поверхности окатышей. Поэтому при нагреве образцов в материале происходили превращения, связанные с окислением magnetита, разложением карбоната кальция и образованием новых химических соединений (ферритов, силикатов кальция и др.).

Найденные из опыта значения энтальпии при нагревании ΔH , кДж/кг и средней физической теплоемкости \bar{c}_p , кДж/(кг·К) исследованных образцов в интервале температур от 273 (нижний предел) до 1473 К (верхний предел) с учетом изменения их фазового и химического состава представлены в виде интерполяционных уравнений:

основность 0,3

$$\Delta H = 0,34(T - 273) + 8,4 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 264 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.03.21.0006.

Химический состав исследуемых окатышей

Chemical composition of the investigated pellets

| Основность | Содержание, % (по массе) | | | | | | | | | |
|------------|--------------------------|-------|------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------------------|------|------|
| | Fe | FeO | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | V ₂ O ₅ | S | ПМПП |
| 0,30 | 59,56 | 25,93 | 1,18 | 3,93 | 2,38 | 2,40 | 2,40 | 0,56 | 0,03 | 1,48 |
| 1,00 | 56,49 | 24,44 | 3,86 | 3,86 | 2,42 | 2,59 | 2,26 | 0,54 | 0,02 | 3,34 |
| 1,30 | 55,30 | 24,20 | 4,93 | 3,79 | 2,26 | 2,54 | 2,22 | 0,52 | 0,02 | 4,20 |
| 1,50 | 53,84 | 23,56 | 5,87 | 3,91 | 2,70 | 2,58 | 2,15 | 0,52 | 0,02 | 4,87 |
| 2,20 | 53,45 | 22,77 | 9,68 | 4,40 | 2,26 | 2,37 | 2,14 | 0,52 | 0,02 | 7,59 |

$$\bar{c}_p = 0,34 + 8,4 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 264 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,0

$$\Delta H = 0,46(T - 273) + 4,85 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 45,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,46 + 4,85 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 45,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,3

$$\Delta H = 0,52(T - 273) + 3,1 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 25,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,52 + 3,15 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 25,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,5

$$\Delta H = 0,575(T - 273) + 3,6 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 17,0 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,575 + 3,6 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 17,0 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 2,2

$$\Delta H = 0,75(T - 273) + 2,5 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 49,4 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,75 + 2,5 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 49,4 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2.$$

При разработке методики расчета окислительного обжига железорудных окатышей в неподвижном слое также вместо действительной теплоемкости окатышей используют ее кажущееся значение. Это связано с тем, что в процессе термической обработки в окатышах протекает ряд сложных экзо- и эндотермических превращений, интенсивность протекания которых зависит от скорости нагрева, размера куска, состава окружающей среды и др. От этих же факторов зависит и количество теплоты, поступающей к окатышам, учесть которое можно только с помощью кажущейся теплоемкости.

Кажущуюся среднюю теплоемкость окатышей \bar{c}_k , кДж/(кг·К) определяли в соответствии с выражением

$$\bar{c}_k = \bar{c}_f \pm \frac{\sum Q_{\text{хим}}}{G \Delta T}, \quad (1)$$

где \bar{c}_f – средняя физическая теплоемкость, кДж/(кг·К); $\sum Q_{\text{хим}}$ – суммарные тепловые эффекты химических реакций, протекающих в окатышах, кДж; G – масса вещества, претерпевающего превращения из расчета на 1 кг окатышей, кг; ΔT – температурный интервал протекания данного процесса, К.

В рассматриваемом случае в окатышах протекали процессы испарения влаги, диссоциации карбонатов и окисления магнетита, т. е.

$$\sum Q_{\text{хим}} = Q_{\text{вл}} + Q_{\text{дис}} - Q_{\text{ок}}. \quad (2)$$

Для изучения кинетических закономерностей процессов удаления влаги, окисления и декарбонизации была использована гравиметрическая установка с непрерывной регистрацией изменения массы окатыша во время обжига [11]. Измерения проводили на аналитических весах с передачей показаний на вторичный прибор и записью данных. Взвешивающее устройство позволяло регистрировать изменение массы образца с точностью до $\pm 0,0005$ г. Обжиг материала производили до температуры 1523 К со скоростью нагрева свыше 50 град/мин в малоинерционной электрической печи. Для обжига материала до температуры 1673 К со скоростью 100 град/мин и выше использовали электрическую печь с плавным подъемом и опусканием образца в рабочее пространство.

Изучению подвергали окатыши основностью 0,3; 1,3 и 2,2. Скорость нагрева для каждой основности составляла 25, 50 и 100 град/мин. Средний диаметр окатышей составлял 12 мм. Окатыш, подвешенный в платиновой корзине к весам, помещали в печь и нагревали с заданной скоростью. При скорости нагрева 25 и 50 град/мин удаление влаги происходило до 573 К, при 373 град/мин – до 623 К. Окисление происходило от 573 К и с ростом скорости нагрева соответственно до 1423, 1473 и 1573 К. Декарбонизация происходила от 873 К и с ростом скорости нагрева для окатышей основностью 0,3 соответственно до 1173, 1223 и 1273 К, для окатышей

основностью 1,3 и 2,2 соответственно до 1273, 1323 и 1373 К. Для разделения процессов окисления и декарбонизации опыт проводили с двумя окатышами одной основности, один из которых обжигали в воздушной среде, а другой – в атмосфере аргона.

Полученные значения изменения массы окатышей от температуры за счет протекания отмеченных процессов использовали для расчетов теплот процессов по формулам, приведенным в работе [11].

Результаты расчетов кажущейся теплоемкости \bar{c}_k представлены в виде графиков на рис. 1. Видно, что в начале (до 523 К) теплоемкость \bar{c}_k возрастает, что связано с удалением влаги, а затем (в интервале от 523 до 673 К) снижается вследствие выделения теплоты в результате поверхностного окисления зерен магнетита. Для окатышей основностью 1,3 и 2,2 значительное возрастание теплоемкости \bar{c}_k в интервале 873 – 1223 К связано с диссоциацией известняка, а снижение теплоемкости окатышей основностью 0,3 обусловлено выделением теплоты от объемного окисления зерен магнетита.

Окислительные процессы, интенсивно проходящие после разложения известняка в окатышах основностью 1,3 и 2,2, резко снижают теплоемкость материала в интервале 1223 – 1423 К. В дальнейшем, по мере завершения окислительного процесса и увеличения диффузионного сопротивления кислороду, вследствие спекания образцов теплоемкость их начинает расти, приближаясь по значению к \bar{c}_ϕ .

Влияние скорости нагрева проявляется в смещении процессов удаления влаги, окисления и декарбонизации в сторону высоких температур. Вследствие этого на графиках кривые кажущихся теплоемкостей окатышей с увеличением скорости нагрева также смещаются в область высоких температур. С увеличением скорости нагрева в области низкотемпературного окисления и декарбонизации кажущаяся теплоемкость окатышей несколько возрастает, а в области высокотемпературного окисления (1323 – 1523 К) падает. Это связано с уменьшением продолжительности обжига окатышей с ростом скорости нагрева. С уменьшением скорости нагрева процессы окисления в низкотемпературной области 573 – 873 К протекают полнее, чем при более высокой скорости нагрева, когда процесс окисления не успевает охватить внутренние слои окатыша. В интервале температур 1073 – 1323 К, относящемуся к разложению известняка, большой перепад температур при более высокой скорости нагрева интенсифицирует процесс декарбонизации, сдвигая его в сторону более низких температур. Все это нашло отражение в ходе кривых кажущейся теплоемкости при разных скоростях нагрева. С увеличением основности кажущаяся теплоемкость возрастает, что вызвано более высоким содержанием известняка и гидратов и меньшим содержанием магнетита. В соответствии с этим возрастает затрата теплоты при протекании эндо- и экзотермических реакций.

Для определения коэффициентов температуропроводности использован квазистационарный метод, основным достоинством которого является простота расчетных соотношений и возможность использования зависимости $a = f(T)$ в режиме непрерывного нагрева. В данном исследовании использована методика, приведенная в работе [12]. Распределение температуры в начальный момент времени принято по параболе второго порядка. Изменение температуры поверхности во времени линейное. При этом расчет искомой величины проводили при помощи выражения для цилиндрического образца:

$$\theta(x, Fo) = \frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \frac{1}{4} \frac{1}{Fo} \frac{b\tau}{\Delta T_0}, \quad (3)$$

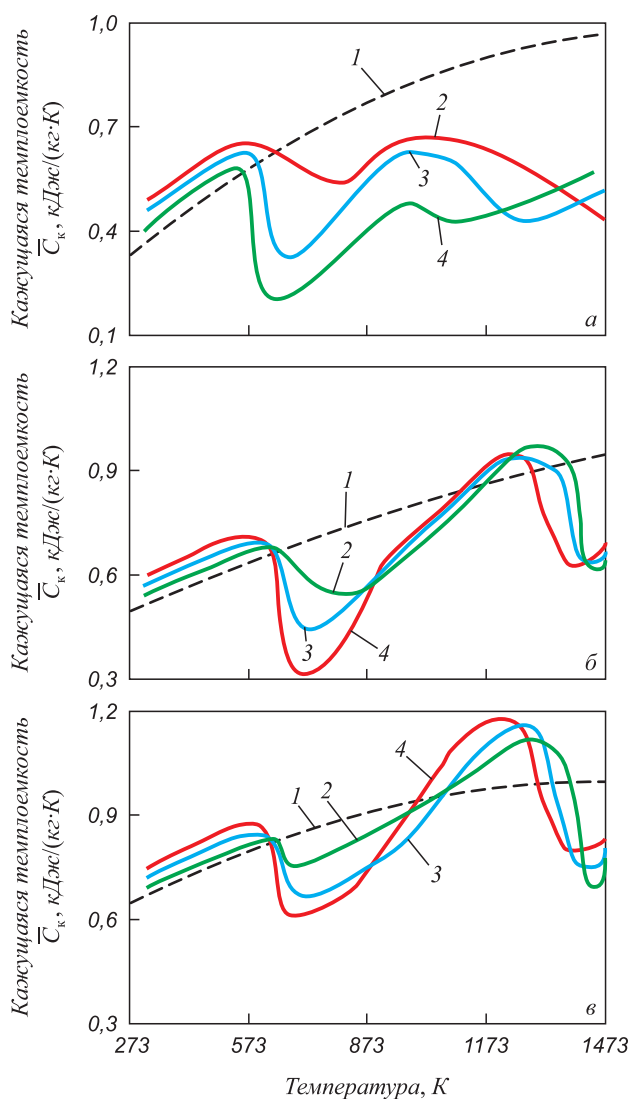


Рис. 1. Зависимости кажущейся теплоемкости окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры:

1 – $\bar{c}_k = f(T)$ и скорости нагрева, град/мин: 2 – 100; 3 – 50; 4 – 25

Fig. 1 Dependences of apparent heat capacity of the pellets with basicity of:

0.3 (a), 1.3 (б) and 2.2 (в) on the temperature

1 – $\bar{c}_k = f(T)$ and the heating rate, deg/min: 2 – 100; 3 – 50; 4 – 25

где θ – относительная температура; $Fo = a\tau/R^2$ – критерий Фурье; ΔT и ΔT_0 – перепад температуры между поверхностью и центром в конце и в начале участка, К; b – скорость нагрева, град/с; τ – время, с.

Поправки, учитывающие переменность скорости нагрева и зависимость коэффициента температуропроводности от температуры, находили по методике, которая описана в работе [13]. При линейной скорости нагрева и перепаде температуры по толщине цилиндра, не превышающей 15 град., величина поправки оказывается пренебрежимо малой.

При обработке результатов опытов термограммы нагрева образцов разбивали на малые участки, в пределах которых $b = \text{const}$. Определяя для каждого участка $\Delta T/\Delta T_0$ и $b\tau/\Delta T_0$, можно по формуле (3) найти значение критерия Fo для любого участка термограммы, а из выражения $Fo = a\tau/R^2$ – коэффициент температуропроводности.

Размеры цилиндрических образцов в зависимости от скорости нагрева 25, 50 и 100 град/мин, составляющие соответственно: $d = 14$ мм, $H = 45$ мм; $d = 12$ мм, $H = 40$ мм; $d = 10$ мм, $H = 30$ мм выбирали из расчета соответствия диаметру окатышей заданного перепада температуры при обжиге. Высоту образцов, соответствующую $H > 3d$, определяли из условия минимума погрешности (около 1 %) при отходе от теоретической модели бесконечного цилиндра. Цилиндры получали путем прессования железорудного концентрата заданной основности при давлении 0,49 МПа. Плотность материала при этом оказалась близкой к плотности окатышей.

Результаты опытных данных приведены на рис. 2. Видно, что с повышением температуры коэффициент температуропроводности окатышей растет. Для температур 573 – 673 К это связано с началом окислительного процесса. Снижение величины коэффициента a в интервале температур 673 – 873 К связано с удалением гидратной влаги, а дальнейший подъем – с продолжением окислительного процесса. Для образцов с основностью 1,3 и 2,2 в интервале 1123 – 1223 К наблюдается резкое снижение коэффициента a , обусловленное процессом диссоциации известняка. В результате диссоциации увеличивается пористость образцов основностью 1,3 и 2,2, в связи с чем в дальнейшем идет более интенсивное окисление по сравнению с образцом основностью 0,3, в котором процесс окисления лимитируется внутренней диффузией кислорода. Для температур выше 1423 – 1473 К наблюдается снижение величины a из-за уменьшения количества остаточного магнетита и увеличения диффузионного сопротивления. Последнее обусловлено развитием процесса спекания, сопровождающегося снижением пористости материала.

С увеличением скорости нагрева кривые коэффициентов температуропроводности, аналогично кривым кажущейся теплоемкости, смещаются в область высоких температур.

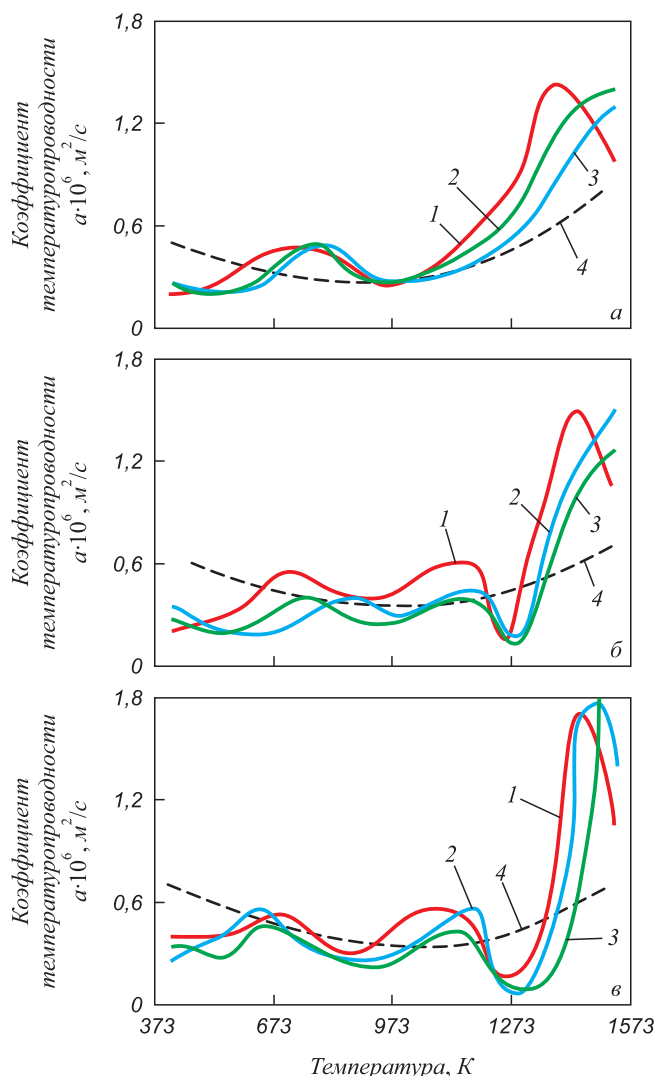


Рис. 2. Зависимости коэффициента температуропроводности окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры и скорости нагрева, град/мин: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – для обожженных окатышей

Fig. 2 Dependences of thermal diffusivity coefficient of the pellets with basicity of: 0.3 (a), 1.3 (б) and 2.2 (в) on the temperature and heating rate, deg/min:

1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – for the fired pellets

Коэффициент теплопроводности определяли из выражения [14, 15]

$$\lambda = a\bar{c}_k\rho_k. \quad (4)$$

Зависимость кажущейся плотности образцов ρ_k , кг/м³ от температуры определяли по изменению массы образца при обжиге. Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и скорости нагрева для окатышей с основностью 0,3, 1,3 и 2,2 показаны на рис. 3. С ростом степени обжигания образцов коэффициент теплопроводности увеличивается. При температуре 1473 К коэффициенты теплопроводности, найденные для обожженных образцов основностью 0,3, 1,3 и 2,2, составляют соответственно 1,85, 1,71 и 1,75 Вт/(м·К).

По-видимому, при температуре 1573 К значения коэффициентов теплопроводности для исследуемых и обожженных образцов будут близки между собой и составят величину, равную 2,0 Вт/(м·К).

Выводы. С помощью известных методов определены теплофизические свойства (средняя физическая и кажущаяся теплоемкости, коэффициенты температуро- и теплопроводности) качканарских титаномagnetитовых окатышей разной основности в зависимости от температуры и скорости нагрева в широком диапазоне изменения температур. Дано объяснение полученным зависимостям с учетом влияния на них процессов испарения влаги, декарбонизации и окисления. Полученные данные могут быть использованы для инженерных расчетов при проектировании новых обжиговых агрегатов, а также при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы существующих.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. Ч. 2. – М.: Издание МГУ, 1966. – 434 с.
2. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of limestone and lime on heating // Steel in translation. 2012. Vol. 42. P. 308 – 311.
3. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of slag-forming mixtures // Steel in translation. 2011. Vol. 41. P. 475 – 479.
4. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
5. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 156 с.
6. Пономарев С.В., Балабанов П.В., Трофимов А.В. Оценка погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов // Измерительная техника. 2004. № 1. С. 44 – 47.
7. Cemushi F., Bison P.G., Figari A. etc. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques // Int. J. Thermophys. 2004. Vol. 25. No. 2. P. 439 – 457.
8. Гуров А.В., Пономарев С.В. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского мгновенного источника теплоты. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с.
9. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 34 – 36.
10. Ponomarev S.V., Mishenko S.V., Irvine T.F. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods. – New York: Beggel House, Inc. Publishers, 2001. – 273 p.
11. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
12. Юрьев Б.П. Методика определения температуропроводности материалов в условиях нестационарной теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 26 – 28.

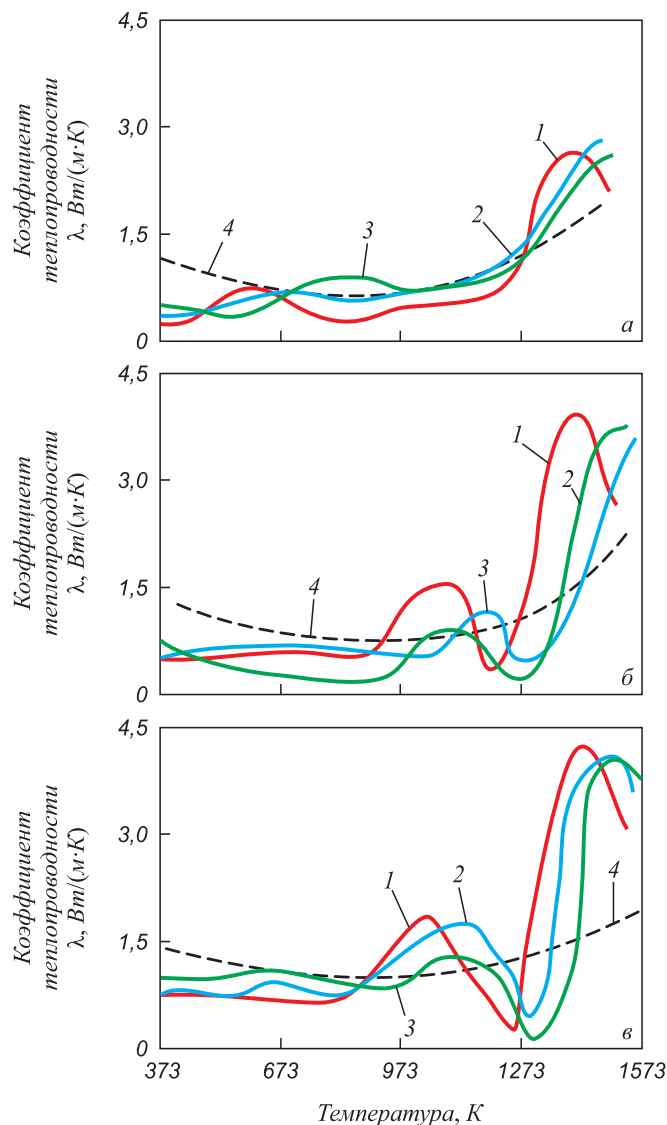


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплопроводности окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры и скорости нагрева, град/мин: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – для обожженных окатышей

Fig. 3 Dependences of thermal conductivity coefficient of the pellets with basicity of: 0.3 (a), 1.3 (b) and 2.2 (v) on the temperature and heating rate, deg/min: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – for the fired pellets

13. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков, Г.М. Волохов, Т.Н. Абраменко и др. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
14. Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2005. – 550 с.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

Поступила 3 июля 2015 г.

THE STUDY OF THERMAL PROPERTIES OF TITANIUM-MAGNETITE KACHKANAR PELLETS

B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev

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

Abstract. The thermo-physical properties of titanium-magnetite Kachkanar pellets of various basicity were carried out. Using the method of mixing, the dependence of the average physical specific heat of pellets under the temperature and phase composition was found. To find an apparent heat capacity of pellets the authors have used the gravimetric system with continuous registration of changes in the mass of pellet which provides the creation of an oxidizing or neutral atmosphere to separate the processes of oxidation and decarbonization. The coefficients of pellets thermal diffusivity were determined using a quasi-steady method enabling simple ratio calculation during continuous heating. The coefficients of thermal conductivity of the pellets were found from the equation connecting the density, heat capacity and thermal diffusivity coefficients. The results are of particular interest and can be used in the design of the new firing units, as well as the optimization of design and operational parameters of the existing ones.

Keywords: titanium-magnetite ore pellets, enthalpy, heat capacity, density, thermal diffusivity coefficient, thermal conductivity coefficient, basic, oxidation, dissociation, firing units.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-328-333

REFERENCES

1. Skuratov S.M., Kolesov V.P., Vorob'ev A.F. *Termokhimiya. Part. 2* [Thermochemistry]. Moscow: Izdanie MGU, 1966, 434 p. (In Russ.).
2. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of limestone and lime on heating. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, Issue 4, pp. 308–311.
3. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of slag-forming mixtures. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, Issue 6, pp. 475–479.
4. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G., Vetrogradskii V.A., Churikov A.A. *Teoreticheskie i prakticheskie osnovy teplofizicheskikh izmerenii: monografiya* [Theoretical and practical bases of thermal measurements: Monograph]. Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.).
5. Fokin V.M., Kovylin A.V., Chernyshov V.N. *Energoeffektivnye metody opredeleniya teplofizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov i izdelii* [Energy-efficient methods for the determination of thermal properties of building materials and products]. Moscow: Izdatel'skii dom "Spektr", 2011, 156 p. (In Russ.).
6. Ponomarev S.V., Balabanov P.V., Trofimov A.V. An estimate of the errors in measuring the thermal properties of solids. *Measurement Techniques*. 2004, vol. 47, no. 1, pp. 66–72.
7. Cemushi F., Bison P.G., Figari A., Marinetti S., Grinzato E. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques. *Int. J. Thermophys.* 2004, vol. 25, no. 2, pp. 439–457.
8. Gurov A.V., Ponomarev S.V. *Izmerenie teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom ploskogo mgnovennogo istochnika teploty: monografiya* [The measurement of thermal properties of thermal insulation materials by flat instant heat source: Monograph]. Tambov: Izd-vo TGTU, 2013, 100 p. (In Russ.).
9. Kuznetsov G.V., Kats M.D. A theoretical analysis of the systematic errors in determining the thermal characteristics of structural materials by a pulse method in a sample of finite dimensions. *Measurement Techniques*. 2009, vol. 52, no. 4, pp. 384–387.
10. Ponomarev S.V., Mishenko S.V., Irvine T.F. *Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods*. New York: Begel House, Inc. Publishers, 2001, 273 p.
11. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Matyukhin O.V., Sheshukov O.Yu. *Opredelenie teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 180 p. (In Russ.).
12. Yur'ev B.P. Thermal diffusivity determination method for non-stable heat conduction. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 26–28. (In Russ.).
13. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N. etc. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity]. Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.).
14. Kartashev E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of heat conduction of solids]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 550 p. (In Russ.).
15. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).

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

Information about the authors:

B.P. Yur'ev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"
(urfu.pervouralsk@gmail.com)

V.A. Gol'tsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"
(urfu.pervouralsk@gmail.com)

Received June 3, 2015