ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Том 59. № 10. С. 735 – 739.
© 2016. *Юрьев Б.П., Гольцев В.А.*

УДК 669.162.12:622.785

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ МАГНЕТИТА*

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 им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. С целью изучения процесса окисления магнетита проведены опыты на крупных монокристаллах магнетита октаэдрической формы, извлеченных из хлоритовых сланцев Шабровского талькового рудника (Средний Урал). Дифференциально-термическим методом получены дифференциальные кривые нагревания образцов, которые показали хорошую воспроизводимость процессов, протекающих при окислительном обжиге магнетита. Рассмотрен механизм процесса окисления магнетита и температурные интервалы протекания экзо- и эндотермических реакций на разных стадиях окисления магнетита. Методом раздельного эталона тепловой эффект окисления магнетита определен по тепловому эффекту эталона ($CaCO_3$) и величинам площадей фигур на термограммах (между дифференциальными кривыми нагрева и осью времени). Эти значения пропорциональны тепловым эффектам эталона и исследуемого вещества (Fe_3O_4). Полученные в работе результаты представляют определенный интерес: зная температурные интервалы окисления магнетита, при установлении режима обжига можно учитывать источники тепловыделения по технологическим зонам обжиговых машин конвейерного типа, тем самым достигая оптимизации теплового режима обжига и снижения удельного расхода топлива.

Ключевые слова: природный магнетит, дифференциальные кривые, окисление, температурные интервалы, теплота, пирометр Курнакова, образец, окатыши, конвейерная обжиговая машина, режим, зона.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-735-739

Обжиг железорудных окатышей сопровождается целым комплексом явлений: окисление магнетита, разложение сульфидов и карбонатов, образование минералов в твердой фазе и из расплава, диффузия, спекание, теплопередача и т.п. [1 – 11]. Многие явления протекают с выделением или поглощением теплоты, что оказывает влияние на тепловое состояние слоя обжигаемых гранул.

Наибольший интерес представляет изучение процесса окисления магнетита, который является основным железосодержащим минералом в окатышах. При этом процессе выделяется достаточно большое количество теплоты [12]. Теплота окисления магнетита, отнесенная к температуре 298 К, составляет примерно 500 кДж/кг. Если среднюю теплоемкость смеси оксидов Fe_3O_4 и Fe_2O_3 определить по табличным значениям истинной теплоемкости [13, 14] как полусумму отношения интеграла функции $C_P = a + bT + c'T^2$, кДж/(кг·К), взятого в данном интервале температур, к разности между верхним и нижним пределами этого же интервала температур и предположить, что окисление магнетита начинается после нагрева материала до 773 К, то окажется, что в адиабатических условиях только за счет теплоты, выделившейся от окисления Fe_3O_4, можно обеспечить повышение температуры смеси оксидов Fe_3O_4 и Fe_2O_3 на 745 К; то есть можно нагреть эту смесь до 1245 К без подвода теплоты от внешнего источника. Учитывая, что содержание магнетита в железорудных концентратах менее 100 %, а реальный процесс нагрева материала сопровождается тепловыми потерями и затратой теплоты на эндотермические реакции (разложение карбонатов, гидратов и т.п.), суммарное тепловыделение в условиях обжига окатышей меньше, чем при адиабатическом окислении чистого магнетита. Однако и в этом случае нельзя пренебрегать тепловыделением, которое является достаточно ощутимым в общем балансе теплоты. Его правильное использование может дать заметную экономию топлива, расходуемого для отопления технологических зон обжиговых установок.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение теплоты окисления единицы массы природного магнетита с оценкой точности измерений и установлением температурных границ, в которых происходит это окисление.

В работе использованы крупные монокристаллы магнетита октаэдрической формы, извлеченные из хлоритовых сланцев Шабровского талькового рудника (Средний Урал). Размер отдельных кристаллов по оси четвертого порядка достигал 2 –3 см. Согласно петрографическому исследованию в образцах магнетита обнаружены отдельные микротрещины, вокруг кото-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.A03.21.0006.

рых заметен продукт распада твердого раствора (пластинки ильменита $FeO \cdot TiO_2$) и обнаружена решетчатая структура. Заметны также единичные включения темно-серого цвета призматической формы, относящиеся к нерудным составляющим с отрицательным рельефом. Образцы имели следующий химический состав: 99,2 % Fe_3O_4; 0,12 % SiO_2; 0,12 % TiO_2; 0,30 % Al_2O_3; 0,12 % MgO; 0,09 % MnO; 0,03 % NiO; 0,02 % CoO (по массе).

Для снятия дифференциальных кривых нагревания образца использовали пирометр Курнакова. Нагрев печи с образцом магнетита осуществляли в атмосфере воздуха с постоянной скоростью 10 К/мин. Для измерения температуры применяли стандартную дифференциальную платинородий-платиновую термопару.

В качестве инертного вещества в рассматриваемом интервале использовали химически чистый оксид Fe_2O_3, прокаленный при 1173 К до постоянной массы. Масса испытываемого образца составляла 3,2 г. Размер зерен не превышал 0,060 мм.

Дифференциальные кривые (рис. 1) показывают хорошую воспроизводимость процессов, протекающих при окислительном обжиге магнетита. Уже при температуре 473 К начинается заметное отклонение дифференциальной кривой нагревания от нулевой базовой линии, что соответствует поверхностному окислению магнетитовых зерен. В этот же период происходит зарождение новой фазы γ-Fe_2O_3, являющейся продуктом низкотемпературного окисления, причем магнитные свойства γ-Fe_2O_3 и Fe_3O_4 почти идентичны. Указанные

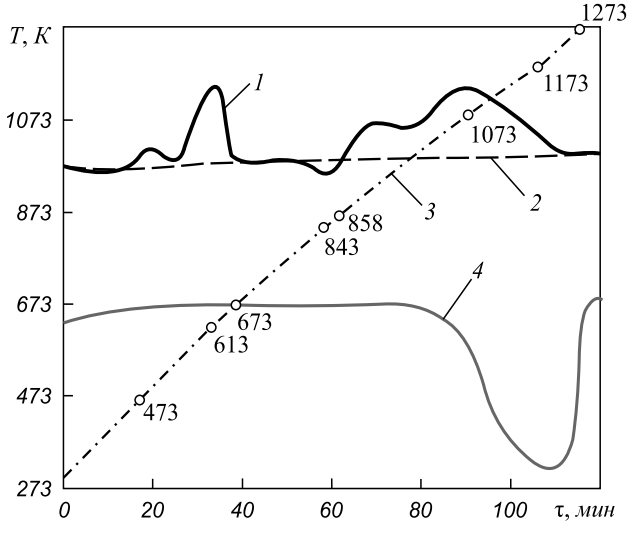

Рис. 1. Изменение температур при нагреве исследуемых образцов: *1* – дифференциальная кривая, полученная при нагреве природного магнетита; *2* – нулевая базовая линия при $\Delta T = 0$; *3* – кривая изменения температуры материала; *4* – дифференциальная кривая, полученная при нагреве карбоната кальция

Fig. 1. Temperature change at heating of the studied samples: *1* – differential curve, obtained when heating native magnetite; *2* – zero base line at $\Delta T = 0$; *3* – material temperature curve; *4* – differential curve, obtained at the heating of calcium carbonate

фазы различаются окраской и наличием у оксида Fe_3O_4 избыточных атомов кислорода, которые не влияют на магнитные свойства. В γ-Fe_2O_3 отсутствует двухвалентное железо. Это исключает предположение о том, что магнитные свойства соединения обусловлены твердым раствором магнетита в ромбоэдрической фазе α-Fe_2O_3. Элементарной ячейке γ-Fe_2O_3 отвечает состав $Fe_{24}O_{36}$, поэтому окисление протекает по реакции, стехиометрическое уравнение которой можно представить в виде

$$\underset{\text{(магнетит)}}{Fe_{24}O_{32}} + 2O_2 \rightarrow \underset{\text{(маггемит)}}{Fe_{24}O_{36}}. \qquad (1)$$

Образованию новой фазы γ-Fe_2O_3 на поверхности зерен магнетита соответствует появление внутреннего диффузионного сопротивления, величина которого пропорциональна толщине слоя вновь образовавшейся фазы. К моменту полного окисления поверхности зерен магнетита процесс окисления сильно затормаживается из-за низких коэффициентов диффузии атомов кислорода и ионов железа через слой γ-Fe_2O_3 при умеренных температурах. Это явление отображено на дифференциальной кривой горизонтальной линией в интервале температур 673 – 843 К. Первый экзотермический эффект, имеющий максимум при 613 К, исчерпывается к моменту достижения образцом температуры 673 К. При температурах выше 858 К дальнейший процесс окисления заметно интенсифицируется по двум причинам: в результате образования микротрещин и дефектов кристаллической решетки, связанным с магнитным превращением железа; вследствие повышения коэффициента диффузии при нагреве исследуемого образца до более высоких температур.

Температура 846 К (в опытах изменялась в пределах 843 – 858 К) известна для магнетита как точка Кюри, относительно которой имеются различные мнения. При достижении точки Кюри вследствие резкого изменения магнитного состояния и, следовательно, внутренней магнитной энергии тела происходит поглощение (или выделение) теплоты. Вследствие этого на дифференциальных кривых нагревания точка Кюри фиксируется в виде незначительного по величине обратимого эндотермического эффекта. Известно, что магнитные превращения всегда сопровождаются незначительными упругими деформациями кристаллической решетки, способствующими образованию в образце микротрещин и дефектов, а также раскрытием зерен магнетита. После поверхностного окисления зерен проявляется второй, растянутый во времени, экзотермический эффект, начинающийся при температуре выше 858 К.

На восходящей ветви термограммы имеется незначительное по величине отклонение, свидетельствующее о наличии эндотермического эффекта при температурах 938 – 948 К, связанного с магнитным превращением гематита, образовавшегося на первой стадии окисления магнетита. Этот эффект способствует еще большему

раскрытию зерен магнетита. Второму экзотермическому эффекту соответствует максимум отклонения показаний дифференциальной термопары при температуре 1073 К. Завершается процесс окисления образца при температуре, близкой к 1273 К. Полноту окисления магнетитовых зерен контролировали по результатам химического анализа, согласно которому содержание FeO в навеске после обжига не превышало 0,6 %.

Для изучения изменения массы образца природного магнетита при нагревании была использована гравиметрическая установка с непрерывной регистрацией изменения массы на аналитических весах со встроенным дифференциально-трансформаторным датчиком с передачей показаний на вторичный самопишущий прибор. Точность взвешивания составляла ±0,0005 г. Кривая изменения массы образца природного магнетита (начальная масса $m_{нач}$ составляла 530 мг) приведена на рис. 2. Установлено, что расхождение между приращением массы образца, определенным по стехиометрическому уравнению реакции окисления магнетита, и приращением массы образца, полученным на экспериментальной установке, составило $(18{,}27 - 18{,}00) \cdot 100 / 18{,}27 = 1{,}48$ % (здесь 18,27 мг – теоретическое увеличение массы образца при окислении магнетита; 18,00 мг – увеличение массы образца, определенное экспериментальным способом).

Для применения полученных дифференциальных кривых для количественных расчетов тепловых эффектов при окислении магнетита были сняты дифференциальные кривые нагрева образцов карбоната кальция марки ЧДА с содержанием основного компонента около 98 %, максимум отклонений которых от оси времени находился при температуре 1173 К.

В соответствии с методом раздельного эталона неизвестный тепловой эффект можно определить по тепловому эффекту эталона ($CaCO_3$) и величинам площадей (S) фигур на термограммах между дифференциальными кривыми нагрева и осью времени, которые пропорциональны тепловым эффектам эталона и исследуемого вещества (Fe_3O_4):

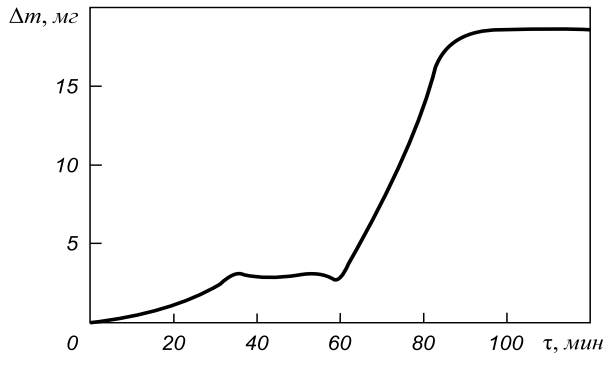

Рис. 2. Кривая изменения массы образца из природного магнетита при нагревании

Fig. 2. Mass curve of the sample from native magnetite at heating

$$\frac{Q_{CaCO_3}}{Q_{Fe_3O_4}} = \frac{S_{CaCO_3}}{S_{Fe_3O_4}}, \qquad (2)$$

откуда

$$Q_{Fe_3O_4} = \frac{Q_{CaCO_3} S_{Fe_3O_4}}{S_{CaCO_3}}. \qquad (2, a)$$

Первая стадия процесса окисления оксида Fe_3O_4 с экзотермическим тепловым эффектом совершалась с максимумом при температуре 613 К, а максимум разложения $CaCO_3$ соответствует 1173 К; поэтому оба процесса приводили к одинаковой температуре 1073 К (к максимальной температуре второй стадии окисления магнетита). С этой целью вводили поправочный коэффициент K_1:

$$K_1 = \frac{\Delta H'_{1073}}{\Delta H''_{613}} = \frac{247{,}680}{226{,}432} = 1{,}092, \qquad (3)$$

где $\Delta H'_{1073}$ – тепловой эффект реакции окисления оставшегося в объеме зерен оксида Fe_3O_4 при температуре 1073 К, кДж/моль; $\Delta H''_{613}$ – тепловой эффект реакции поверхностного окисления зерен магнетита при температуре 613 К, кДж/моль.

Имея в виду площадь одной и той же фигуры, ограниченной дифференциальной кривой и осью времени, отнесенную к разным температурам, можно записать аналогичное соотношение:

$$K_1 = \frac{S''_{1073}}{S''_{613}} = 1{,}092, \qquad (3, a)$$

где S''_{1073} – площадь фигуры, которая образована на термограмме дифференциальной кривой, отвечающей процессу окисления зерен Fe_3O_4 с поверхности при температуре 1073 К; S''_{613} – площадь фигуры, образованной на термограмме дифференциальной кривой, отвечающей процессу окисления зерен Fe_3O_4 с поверхности при температуре 613 К ($S''_{613} = 1{,}548 \cdot 10^{-4}$ м^2).

Из выражения (3, *а*) определим: $S''_{1073} = S''_{613} K_1 = 1{,}548 \cdot 1{,}092 = 1{,}69 \cdot 10^{-4}$ м^2.

Общая площадь фигуры, полученная при окислении магнетита, составит

$$S_{общ} = S'_{1073} + S''_{1073} = 11{,}10 \cdot 10^{-4} + 1{,}69 \cdot 10^{-4} = 12{,}79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где $S'_{1073} = 11{,}10 \cdot 10^{-4}$ м^2 – площадь фигуры, которая образована на термограмме дифференциальной кривой при окислении остаточного магнетита при 1073 К.

Аналогичным способом приводили к температуре 1073 К площадь фигуры на термограмме процесса при разложении $CaCO_3$ при температуре 1173 К:

$$K_2 = \frac{\Delta H'_{1073}}{\Delta H''_{1173}} = \frac{S'_{1073}}{S''_{1173}} = \frac{167{,}173}{164{,}853} = 1{,}014,$$

где $\Delta H'_{1073} = 167{,}173$ и $\Delta H''_{1173} = 164{,}853$ – тепловые эффекты реакции разложения карбоната кальция при температурах 1073 и 1173 К, кДж/моль; $S'_{1073} = K_2 S''_{1173} = 1{,}014 \cdot 20{,}14 = 20{,}43$ см^2; S''_{1173} – площадь фигуры, полученная на термограмме дифференциальной кривой при разложении $CaCO_3$ при температуре 1173 К.

Тогда из выражения (2, *а*) находим, что

$$Q_{Fe_3O_4} = \frac{\frac{12{,}79 \cdot 10^{-4}}{3{,}2 \cdot 10^{-3}} 1671{,}70}{\frac{20{,}43 \cdot 10^{-4}}{1{,}5 \cdot 10^{-3}}} = \frac{668{,}157}{1{,}362} = 491 \text{ кДж/кг},$$

где $12{,}79 \cdot 10^{-4}$ – общая площадь фигуры, образованной на термограмме дифференциальной кривой при окислении магнетита, м^2; $20{,}43 \cdot 10^{-4}$ – площадь фигуры, образованной на термограмме дифференциальной кривой при разложении $CaCO_3$ при 1173 К, м^2; 1671,70 кДж/кг – количество теплоты, необходимое для разложения 1 кг $CaCO_3$; $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ и $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг – массы образцов Fe_3O_4 и $CaCO_3$.

Найденное из опыта значение теплоты окисления Fe_3O_4 сравнивали с расчетным на основе термодинамических данных в соответствии со стехиометрическим уравнением реакции [15]:

$$2Fe_3O_4 + 0{,}5O_2 = 3Fe_2O_3. \quad (4)$$

Термодинамические данные пересчитывали на температуру опыта по формулам

$$\Delta H^{\circ}_{298} = 3\Delta H^{Fe_2O_3}_{298} - 2\Delta H^{Fe_3O_4}_{298} \quad (5)$$

и

$$\Delta H_T = \Delta H^{\circ} + \int_0^T C_P dT, \quad (6)$$

где $\Delta H^{Fe_2O_3}_{298}$ и $\Delta H^{Fe_3O_4}_{298}$ – теплота образования оксидов Fe_2O_3 и Fe_3O_4 из кислорода и железа при температуре 298 К; $\Delta H^0 = \Delta H_{298} - \int_0^{298} C_P dT$; $C_P = a + bT + \frac{c}{T^2}$; ΔH^0 – изменение энтальпии при постоянном стандартном давлении 101,324 кПа, кДж/кг; ΔH_{298} – изменение энтальпии при температуре 298 К, кДж/кг; C_P – теплоемкость вещества, кДж/(кг·К); a, b, c – коэффициенты, определяемые расчетным путем при обработке экспериментальных данных.

Расчетами определено, что при окислении 1 кг магнетита выделяется 533,4 кДж/кг теплоты, что несколько больше опытного значения 491 кДж/кг. Расхождение экспериментальных и расчетных данных (около 8 %) следует отнести за счет ошибок измерений, а также ошибок в значениях табличных данных в справочной литературе, принятых авторами для расчета теплоты окисления магнетита.

Выводы. С помощью дериватографа проведено изучение процесса окисления природного магнетита, который является основным железосодержащим минералом в магнетитовых окатышах и при нагреве которого выделяется значительное количество теплоты. Рассмотрен механизм процесса окисления магнетита и установлены температурные границы протекания экзо- и эндотермических реакций. Опытным и расчетным способами определена теплота окисления магнетита. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимных параметров при термической обработке магнетитовых окатышей на ленте обжиговой конвейерной машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 5. P. 400 – 403.
2. Readman P.W., O'Reilly W. Oxidation processes in titanomagnetites // Z. Geophis. 1971. Vol. 37. No. 3. P. 329 – 338.
3. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. No. 3. P. 336 – 338.
4. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 360 с.
5. Малышева Т.Я., Юсфин Ю.С., Плотников С.В. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 3 – 5.
6. Плотников С.В., Бормотов А.С. Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 3. С. 29 – 32.
7. Кокорин Л.К., Лелеко С.Н. Производство окисленных окатышей: технология, оборудование. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 280 с.
8. Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Термодинамика спекания железорудного окатыша // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 2. С. 11 – 13.
9. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. – М.: Интеллект, 2011. – 536 с.
10. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Интеллект, 2008. – 408 с.
11. Yur'ev B.P. Heat transfer in a bed of iron – ore pellets // Steel in Translation. 2010. Vol. 40. No. 4. P. 330 – 333.
12. Волков А.И., Жарский И.М. Термодинамические характеристики веществ: справочник. – М.: Букмастер, 2014. – 288 с.
13. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Константы неорганических веществ: справочник. – М.: Дрофа, 2006. – 691 с.
14. Кипер Р.А. Физико-химические свойства веществ: справочник по химии. – Хабаровск: Прондо, 2013. – 1016 с.
15. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 671 с.

Поступила 28 декабря 2015 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2016. Vol. 59. No. 10, pp. 735–739.

STUDY OF THE MAGNETITE OXIDATION

B.P. Yur'ev, V.A. Goltsev

Ural Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin, Russia, Ekaterinburg

Abstract. To study the process of magnetite oxidation the experiments had been conducted on large single crystals of magnetite having octahedral form and retrieved from chlorite schist in Shabrovski talc mine (the Middle Urals). Using the method of differential thermal curves obtained by differential heating of samples the good reproducibility of the processes that occur during oxidative roasting magnetite was shown. The mechanism of the magnetite oxidation and temperature ranges of exothermic and endothermic reactions in various stages of magnetite oxidation was considered. Using the method of separated standard the unknown thermal effect of magnetite oxidation was determined in accordance with the standard thermal effect ($CaCO_3$) and the values obtained in the areas of the figures in thermograms concluded between the differential heating curve and the axis of time proportional to the thermal effects of the standard and the test substances (Fe_3O_4). The obtained results are of some interest. Knowing the temperature intervals of magnetite oxidation, it can be taken into account in establishing the mode of burning heat source for technological zones in conveyor type roasting machines. This achieves optimization of the firing thermal regime and reduction in specific fuel consumption.

Keywords: natural magnetite, differential curves, oxidation, temperature ranges, heat, Kurnakov pyrometer, sample, pellets, conveyor roasting machine, regime, zone.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-10-735-739

REFERENCES

1. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 400–403.

2. Readman P.W., O'Reilly W. Oxidation processes in titanomagnetites. *Z. Geophis*. 1971, vol. 37, no. 3, pp. 329–338.

3. Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Conversion of magnetite to hematite in iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 3, pp. 336–338.

4. Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Obshchaya mineralogiya* [General mineralogy]. Moscow: Akademiya, 2008, 360 p. (In Russ.).

5. Malysheva T.Ya., Yusfin Yu.S., Plotnikov S.V. Technological aspects of production of pellets from magnetite ore. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 9, pp. 3–5. (In Russ.).

6. Plotnikov S.V., Bormotov A.S. Phase transformation mechanism at oxidation burning of industrial pellets, produced from iron quartzite ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 3, pp. 29–32. (In Russ.).

7. Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo okislennykh okatyshei: tekhnologiya, oborudovanie* [Production of oxidizing pellets: technology, equipment]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PR i reklamy "Marat", 2004, 280 p. (In Russ.).

8. Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Thermodynamics of sintering process of iron ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 2, pp. 11–13. (In Russ.).

9. Mehrer Helmut. *Diffusion in solids. Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. (Russ.ed.: Mehrer H. *Diffuziya v tverdykh telakh*. Moscow: Intellekt, 2011, 536 p.)

10. Frank-Kamenetskii D.A. *Osnovy makrokinetiki. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Basics of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Intellekt, 2008, 408 p. (In Russ.).

11. Yur'ev B.P. Heat transfer in a bed of iron – ore pellets. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 4, pp. 330–333.

12. Volkov A.I., Zharskii I.M. *Termodinamicheskie kharakteristiki veshchestv: spravochnik* [Thermodynamic characteristics of substances: Reference book]. Moscow: Bukmaster, 2014, 288 p. (In Russ.).

13. Lidin R.A., Andreeva L.L., Molochko V.A. *Konstanty neorganicheskikh veshchestv: spravochnik* [Constants of nonorganic substances: Reference book]. Moscow: Drofa, 2006, 691 p. (In Russ.).

14. Kiper R.A. *Fiziko-khimicheskie svoistva veshchestv: spravochnik po khimii* [Physical and chemical properties of substances: Reference book on chemistry]. Khabarovsk: Prondo, 2013, 1016 p. (In Russ.).

15. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov. Ch. 1* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes. Part 1]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1962, 671 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was supported by the Act 211of 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 of "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"* (yurev-b@mail.ru)

V.A. Goltsev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"* (v.a.goltsev@urfu.ru)

Received December 28, 2015