

КИНЕТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕГИДРАТАЦИИ ЛИСАКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА*

*Карелин В.Г.¹, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории грануляции
металлургических расплавов (karelin@lab62.vniimt.ru)*

Зайнуллин Л.А.^{1,2}, д.т.н., профессор, генеральный директор (aup@vniimt.ru)

*Епишин А.Ю.¹, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории грануляции
металлургических расплавов (epishin.artem@yandex.ru)*

¹ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» («ВНИИМТ») (620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Лисаковское месторождение бурого железняка (Кустанайская область, Казахстан) разрабатывается открытым способом, что обеспечивает более дешевую добычу руды. На фабрике ЛФ ТОО «Оркен» гравитационно-магнитным способом производят обогащение руды с получением гравитационно-магнитного концентрата, содержащего 48 – 49 % Fe, 10 – 12 % SiO₂, 4,5 – 5,5 % Al₂O₃, 0,7 – 0,9 % P. Полученный продукт поступает на агломерацию в АО «АрселорМиттал Темиртау» (г. Темиртау, Казахстан). Из-за повышенного содержания фосфора в гравитационно-магнитном концентрате спрос на него ограничен. В лисаковском концентрате содержится значительное количество гидратной влаги (до 12 %). Большая часть влаги находится в виде гидратов железа и разлагается при умеренной температуре 320 – 350 °С. Другая часть, судя по всему, связана с фосфорсодержащим компонентом, разлагающимся при повышенной температуре. При этом в процессе окислительного обжига происходит образование свободного оксида фосфора. Проведены исследования разложения гидратного фосфорсодержащего компонента в лисаковском железорудном концентрате с целью определения кинетики процесса. Удаление фосфора из железорудного концентрата на стадии подготовки к металлургическому переделу возможно после высокотемпературного окислительного обжига материала и последующего сернокислотного выщелачивания. Из исходного концентрата гидрометаллургическим способом фосфор не выщелачивается. Необходимо при помощи высокой температуры разрушить химическую связь и перевести фосфор в свободный оксид. От полноты разложения гидратного фосфорсодержащего компонента при обжиге зависит качество последующей сернокислотной обработки обожженного продукта. Выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато. С ростом температуры прокаливания скорость высокотемпературной дегидратации уменьшается, что объясняется замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой материала, который уплотняется при увеличении температуры.

Ключевые слова: руда, концентрат, обжиг, кислота, выщелачивание, фосфор, компонент, гидратная влага, кинетика, разложение, температура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-656-661

Лисаковский железорудный концентрат представлен бурым железняком [1, 2] и имеет повышенное содержание фосфора (до 0,8 – 0,9 %), что сдерживает масштаб производства концентрата, в котором содержатся также гидраты (до 12 %), имеющие различную природу. Основная доля гидратов связана с оксидом железа, а меньшая (около 1,0 – 1,5 %) с фосфорсодержащим компонентом. Гидраты железа разлагаются с выделением гидратной влаги при относительно пониженной температуре 320 – 350 °С. Гидраты фосфорсодержащего компонента разлагаются при температуре 800 °С и выше [3 – 5].

Выполнены многочисленные исследования по изучению проблемы обесфосфоривания лисаковских руд [6 – 11]. Для удаления фосфора из лисаковского концентрата перед металлургическим переделом разработана технология, в основе которой лежит высоко-

котемпературный окислительный обжиг материала с последующим выщелачиванием фосфора водным раствором слабой серной кислоты [12 – 14]. Из исходного концентрата фосфор не переходит в раствор, так как находится в связанном состоянии. В процессе окислительного обжига фосфорсодержащий компонент разлагается (дегидратируется), в результате чего фосфор в виде оксида становится свободным и может быть переведен в раствор, например, слабой (5 %-ной) серной кислоты [3 – 5].

Вопросы, связанные с низкотемпературной дегидратацией лисаковского концентрата, рассмотрены ранее [15, 16]. Ниже представлены результаты экспериментального исследования кинетики высокотемпературной дегидратации лисаковского гравитационно-магнитного концентрата. Исследование проведено термометрическим методом [17 – 19] на приборе NETZSCH STA 449 C Jupiter, на котором одновременно при изменяющейся температуре авто-

* Работа выполнена при финансовой поддержке, постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.А03.21.0006.

матически определяются изменение массы (термогравиметрия) и калориметрические эффекты (дифференциальная сканирующая калориметрия) в образце. Встроенные электромагнитные компенсационные микровесы с верхней загрузкой измеряют массу образца в граммах с точностью до четвертого знака после запятой. Вакуум-плотная конструкция камеры с образцом обеспечивает измерения в заданной газовой атмосфере. Электрическая печь прибора позволяет проводить измерения при температурах от 20 до 1650 °С.

В качестве образца использовали частицы лисаковского гравитационно-магнитного концентрата крупностью до 3 мм и массой около 5 г, имеющих округлую форму. Нагрев пробы производили по следующему режиму: от комнатной температуры до 700 °С со скоростью 50 °С/мин, далее следовала выдержка до постоянного веса, после чего с такой же скоростью увеличивали температуру до 800 °С с выдержкой 30 мин и затем ступенчато через 50 °С до температуры 1000 °С с выдержками по 30 мин на каждой температурной ступени.

Уменьшение массы образца на каждой температурной ступени связано с удалением высокотемпературной гидратной влаги, содержащейся в фосфорсодержащем компоненте концентрата. В специальном опыте пары, выделяющиеся при высокой температуре, были уловлены силикагелем, что атрибутирует их как воду. Скорость изменения массы пробы характеризует кинетику разложения этого гидратированного фосфорсодержащего компонента. Длительность выдержки 30 мин на каждой температурной ступени была достаточной для стабилизации изменения массы образца, т. е. завершения процесса высокотемпературной дегидратации при данной температуре. Внешняя и низкотемпературная гидратная влага удалялись в ходе нагрева пробы до 700 °С.

На рис. 1 представлены изменения массы образца во времени на всех температурных ступенях. Как видно, выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато: при каждой температуре выделяется определенная доля гидратной влаги. Если за 100 % принять суммарную массу

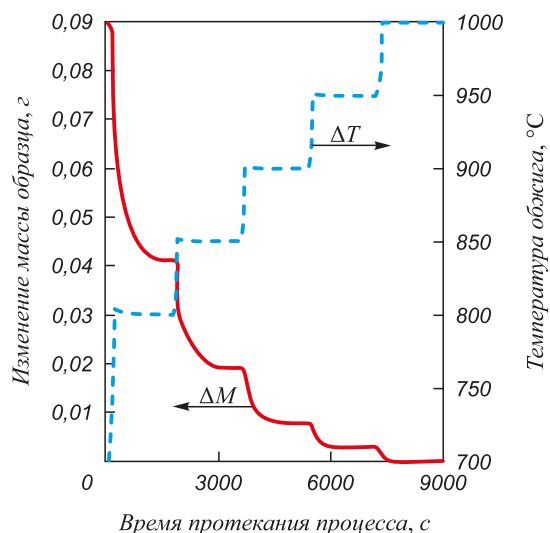


Рис. 1. Зависимость изменения массы образца во времени в заданном температурном режиме

Fig. 1. Dependence of change over time of the sample mass in a given temperature regime

высокотемпературной гидратной влаги, выделившейся в диапазоне температур 800 – 1000 °С, то доля такой гидратной влаги, удаленной при разных температурах, составляет, %: 54,5 при 800 °С, 24,4 при 850 °С, 12,2 при 900 °С, 5,6 при 950 °С и 3,3 при 1000 °С (см. таблицу). На каждой температурной ступени калориметрическая система прибора зафиксировала эндотермические эффекты, совпадающие с выделением высокотемпературной гидратной влаги. Как видно из представленных данных, более половины общей высокотемпературной гидратной влаги выделяется при 800 °С. С увеличением температуры доля выделившейся гидратной влаги на каждой температурной ступени резко уменьшается и при 1000 °С составляет всего 3,3 %. Если полученные данные проэкстраполировать в область температур выше 1000 °С, то последняя порция высокотемпературной гидратной влаги будет удалена при 1050 – 1100 °С. Однако в этой области температур уже начинает проявляться процесс спекания лисаковского концентрата, что не позволяет проводить прямые измерения при таких повышенных температурах.

Результаты исследования кинетики высокотемпературной дегидратации лисаковского железорудного концентрата

Research results of high-temperature dehydration kinetics of Lisakovsk iron ore concentrate

Показатель	Температура обжига концентрата, °С				
	800	850	900	950	1000
Доля выделившейся высокотемпературной гидратной влаги, %	54,5	24,4	12,2	5,6	3,3
Максимальная скорость высокотемпературной дегидратации, 10 ⁻⁵ , г/с	5,8	4,8	3,3	1,5	1,0
Длительность высокотемпературной дегидратации, с	1250	1110	910	670	420

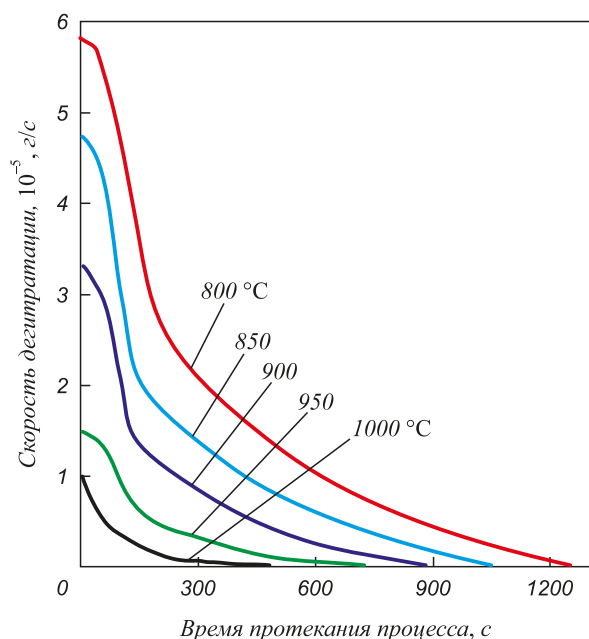


Рис. 2. Зависимость скорости высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата от времени протекания процесса при различных температурах

Fig. 2. Dependence of the rate of high-temperature dehydration of Lisakovsk concentrate from process time at different temperatures

На рис. 2 представлены кривые скорости высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата при различных температурах и их изменение во времени. С увеличением температуры величина максимальной скорости процесса уменьшается (см. таблицу). Такой характер зависимости объясняется некоторым замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой уже дегидратированного материала, который при увеличении температуры претерпевает твердофазное уплотнение. Частично диффузия водяных паров через слой дегидратированного материала облегчается при образовании трещин в этом слое, которые появляются на частицах концентрата при высоких температурах.

Для каждой температурной ступени рассчитали изменение степени высокотемпературной дегидратации во времени (доли единицы) как отношение массы удаленной гидратной влаги от начала температурной стадии до текущего времени процесса к общей массе выделившейся гидратной влаги на данной температурной ступени. На рис. 3 представлены кривые изменения степени высокотемпературной дегидратации во времени при различных температурах. Как видно, при одинаковой длительности процесса с увеличением температуры степень высокотемпературной дегидратации возрастает, а при значении степени дегидратации 1,0 разложение фосфорсодержащего компонента завершается для каждой температурной ступени. Определение времени окончания дегидратации методом взвешивания массы было затруднено вследствие достижения

предела точности электронных весов. Поэтому длительность высокотемпературной дегидратации на различных температурных стадиях была определена следующим способом.

Известно, что процессы дегидратации подчиняются закономерностям гетерогенных реакций, в которых образование реакционной зоны протекает очень быстро по сравнению со скоростью химической реакции и не лимитирует последнюю [20]. Для таких реакций скорость процесса монотонно уменьшается во времени, что и видно на рис. 2. Поэтому для реакций дегидратации твердых сферических частиц лисаковского концентрата кинетика процесса подчиняется закону [20]

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = K_i \tau,$$

где α – степень высокотемпературной дегидратации, доли единицы; τ – время протекания процесса дегидратации, с; K_i – константа скорости высокотемпературной дегидратации, с⁻¹ (в расчете на 1 г исходного материала).

На рис. 4 представлена зависимость величины $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ от времени протекания процесса высокотемпературной дегидратации τ при различных температурах. Как видно, такие зависимости имеют линейный вид. Экстраполируя эти зависимости до значения $A = 1,0$ (при $\alpha = 1,0$), определены значения длительности (τ_i , с) дегидратации при разных температурах (см. таблицу). Из таблицы следует, что с увеличением температуры от 800 до 1000 °C длительность процесса

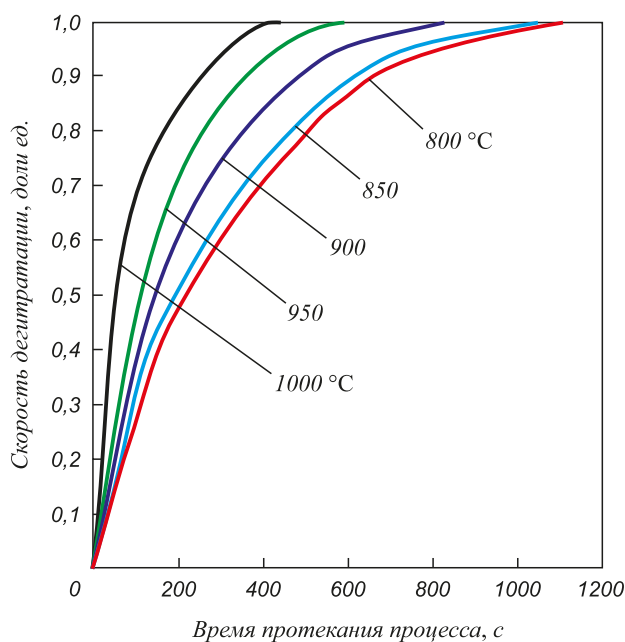


Рис. 3. Зависимость степени высокотемпературной дегидратации лисаковского концентрата от времени протекания процесса при различных температурах

Fig. 3. Dependence of high-temperature dehydration degree of Lisakovsk concentrate on process time at different temperatures

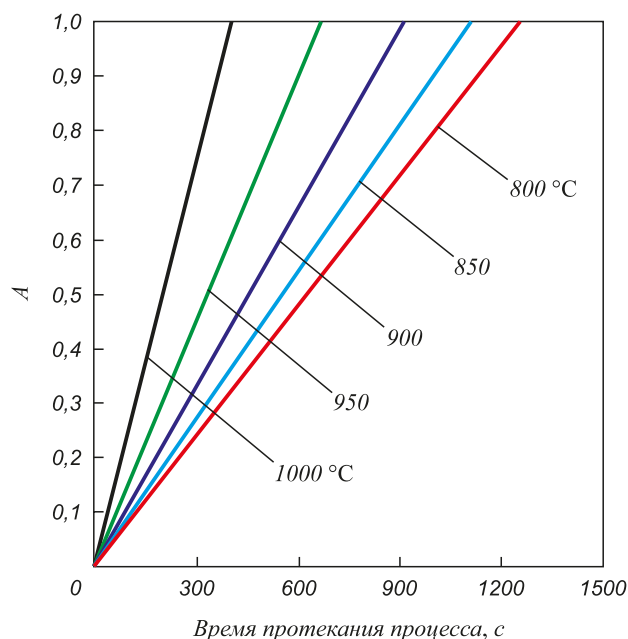


Рис. 4. Зависимость величины $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ от времени протекания процесса высокотемпературной дегидратации при различных температурах

Fig. 4. Dependence of $A = 1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ on process time of high-temperature dehydration at different temperatures

высокотемпературной дегидратации на данной температурной ступени монотонно уменьшается от 1250 до 420 с. Указанные времена для каждой температуры коррелируют с окончанием проявления эндотермических эффектов, зарегистрированных калориметрической системой прибора.

Ниже приведены расчетные величины констант скорости высокотемпературной дегидратации K_i при различных температурах обжига.

Температура обжига концентрата, °C	800	850	900	950	1000
Константа скорости высокотемпературной дегидратации, с ⁻¹	0,0025	0,0015	0,0011	0,0009	0,0008

Как видно, константа скорости высокотемпературной дегидратации K_i уменьшается с возрастанием температуры обжига и подчиняется закону Аррениуса

$$K_i = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где K_0 – предэкспоненциальный коэффициент; E – энергия активации, Дж/моль; R – газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К.

Эта зависимость в полулогарифмических координатах изображена на рис. 5 и имеет линейный вид. Из уравнения прямой, представленной на этом рисунке, рассчитали энергию активации процесса высокотемпе-

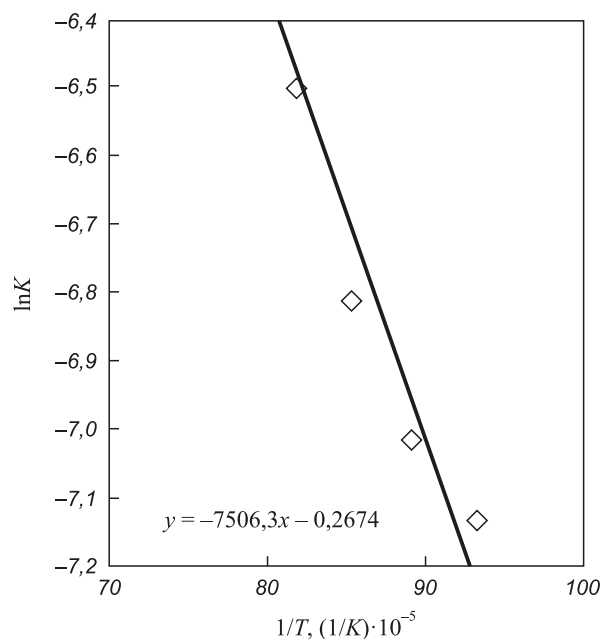


Рис. 5. Зависимость величины натурального логарифма константы скорости высокотемпературной дегидратации от обратного значения температуры концентрата

Fig. 5. Dependence of natural logarithm of the high-temperature dehydration rate constant on return value of the concentrate temperature

ратурной дегидратации $E = 143,7$ кДж/моль и коэффициент $K_0 = 1,3$.

Выводы. Результаты исследований лисаковского гравитационно-магнитного концентрата термометрическим методом показали, что выделение высокотемпературной гидратной влаги из лисаковского концентрата происходит ступенчато. С ростом температуры прокаливания скорость высокотемпературной дегидратации уменьшается, что объясняется замедлением диффузии водяных паров при дегидратации через слой материала, который уплотняется при увеличении температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акатов А.И., Герасимов А.Г., Тацienко П.А. Обогащение бурых железняков Лисаковского месторождения на опытной обогатительной фабрике Сибэлектросталь // Обогащение руд. 1957. № 6. С. 3 – 8.
2. Тацienко П.А., Долгих М.А. Обжигмагнитное обогащение руд Лисаковского месторождения // Обогащение полезных ископаемых. 1977. № 21. С. 44 – 48.
3. Епишин А.Ю., Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А. Поведение фосфорсодержащего компонента при высокотемпературном обжиге лисаковского железорудного концентрата // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 59 – 60.
4. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Комбинированная пиро-гидрометаллургическая технология обесфосфоривания бурого железняка лисаковского месторождения // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2015. № 2. С. 10 – 15.
5. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Епишин А.Ю., Артов Д.А. Особенности пиро-гидрометаллургической технологии обесфосфоривания бурого железняка лисаковского месторождения // Сталь. 2015. № 3. С. 8 – 11.

6. Епишин А.Ю., Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г. Исследование обжига лисаковского железорудного концентрата для определения температуры разложения гидратного фосфорсодержащего минерала // Матер. X Всеросс. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и специалистов. – Магнитогорск, 2009. С. 144 – 147.
7. Епишин А.Ю., Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г. О дефосфорации бурого железняка методом выщелачивания с предварительным обжигом // Сб. матер. VIII конгресса обогатителей стран СНГ. – М., 2011. С. 83 – 86.
8. Левинтов Б.Л., Мирко В.А., Пчелинцева О.А. Состояние и перспективы решения проблемы обесфосфоривания трудновсываемого железорудного сырья Казахстана. – В кн.: Создание научных основ принципиально новых химических и металлургических технологий, адаптированных к сырьевой базе Казахстана. – Алматы: Комплекс, 2003. С. 137 – 142.
9. Пчелинцева О.А., Мажренова Н.Р., Левинтов Б.Л. О возможности радиационного стимулирования процесса обесфосфоривания лисаковских концентратов // Комплексное использование минерального сырья. 2003. № 3. С. 57.
10. Левинтов Б.Л., Мирко В.А., Кантемиров М.Д. и др. Особенности строения бурожелезняковых руд и их влияние на эффективность термохимического обогащения лисаковских концентратов // Сталь. 2007. № 8. С. 8 – 11.
11. Пат. 2413012 РФ. Способ очистки железосодержащего материала от мышьяка и фосфора / И.Г. Ковзун, З.Р. Ульберг, И.Т. Проценко и др.; заявл. 16.11.2009., опубл. 27.02.2011. Бюл. изобретений. 2009. № 6.
12. Пат. 2184158 РФ. Способ очистки железорудного концентрата от примеси фосфора / В.В. Беликов, В.Б. Огородов, А.О. Ядрышников и др.; заявл. 23.05.2001., опубл. 27.06.2002. Бюл. изобретений. 2002. № 18.
13. Беликов В.В., Огородов В.Б., Ядрышников А.О., Михайловича Н.А. Обесфосфоривание бурожелезняковых руд и концентратов // Обогащение руд. 2003. № 3. С. 8 – 12.
14. Naydyonov V.A. Experience of operation of Lisakovsk deposit of brown iron ore // International Seminar on Vision Mineral Development. Bhubaneswar, India. 2005. P. 83 – 87.
15. Карелин В.Г., Резвов Г.А. Особенности дегидратации лисаковских материалов // Сб. тезисов совещания «Проблемы обогащения и комплексной переработки фосфористых лисаковских руд». Темиртау, 1979. С. 38 – 39.
16. Карелин В.Г., Резвов Г.А., Кузовникова Е.А. Кинетические особенности дегидратации лисаковского концентрата в кипящем слое // Металлургическая теплотехника. 1975. № 4. С. 153 – 156.
17. Иванова В.П. Термический анализ минералов и горных пород / В.П. Иванова, Б.К. Касагов, Т.Н. Красавина, Е.Л. Розина. – Л.: Недра, 1974. – 399 с.
18. Уэндландт У. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978. – 572 с.
19. Шестак Я. Теория термического анализа. – М.: Мир, 1987. – 456 с.
20. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций. – М.: Мир, 1972. – 554 с.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 8, pp. 656–661.

KINETICS OF HIGH-TEMPERATURE DEHYDRATION OF LISAKOVSK IRON ORE CONCENTRATE

V.G. Karelin¹, L.A. Zainullin^{1,2}, A.Yu. Epishin¹

¹OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”), Ekaterinburg, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. Lisakovsk deposit of brown iron ore (Kostanay region, Kazakhstan) is developed by the open method, which provides cheaper ore mining. At the LF LLP “Orken”, the ore is enriched in a gravity-magnetic process to produce a gravitational-magnetic concentrate containing 48 to 49 % of Fe, 10 to 12 % of SiO₂, 4.5 to 5.5 % of Al₂O₃ and 0.7–0.9 % of P. The product is supplied to the agglomeration in JSC “Arcelor Mittal Temirtau” (Temirtau, Kazakhstan). Because of the increased content of phosphorus in the gravitational-magnetic concentrate, the demand for it is limited. Lisakovsk concentrate contains a significant amount of hydrated moisture (up to 12 %). Most of the moisture is in the form of iron hydrates and decomposes at a moderate temperature of 320–350 °C. The other part, apparently, is associated with a phosphorus-containing component decomposing at elevated temperature. In this process, oxidative firing results in the formation of free phosphorus oxide. Studies on decomposing a hydrated phosphorous-containing component in Lisakovsk iron ore concentrate were undertaken to determine kinetics of the process. Removal of phosphorus from the iron ore concentrate during preparation for metallurgical processing is possible after high-temperature oxidizing roasting of the material and subsequent sulphuric acid leaching. Phosphorus is not leached from the original concentrate by hydrometallurgical method. Using high temperature, it is necessary to break the chemical bond and transfer phosphorous to a free oxide. Complete decomposing of the hydrated phosphorous-containing component at roasting affects the quality of subsequent sulphuric acid treatment of the roasted product. High-temperature hydrate moisture is exuded from Lisakovsk concentrate step-by-step. The rate of high-temperature dehydration de-

creases with the rise of calcination temperature, which is explained by slow water vapour diffusion through the layer of material that becomes packed at the temperature rise.

Keywords: ore, concentrate, roasting, acid, leaching, phosphorus, component, hydrate moisture, kinetics, decomposing, temperature.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-656-661

REFERENCES

1. Akatov A.I., Gerasimov A.G., Tatsienko P.A. Enrichment of hematites of Lisakovsky field at Sibelectrostral experimental concentrating factory. *Obogashchenie rud.* 1957, no. 6, pp. 3–8. (In Russ.).
2. Tatsienko P.A., Dolgikh M.A. Magnetic roasting enrichment of ores of the Lisakovsky field. *Obogashchenie poleznykh iskopaemykh.* 1977, no. 21, pp. 44–48. (In Russ.).
3. Epishin A.Yu., Karelin V.G., Zainullin L.A. The behavior of a phosphorus-containing component by a high-temperature roasting of Lisakovsk iron ore concentrate. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 12, pp. 59–60.
4. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A. Combined pyro-hydrometallurgical technology of dephosphorization of hematites of Lisakovsky field. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta “Chermetinformatsiya”.* 2015, no. 2, pp. 10–15. (In Russ.).
5. Karelin V.G., Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A. Features of pyro-hydrometallurgical technology of dephosphorization of hematite of Lisakovsky field. *Stal’.* 2015, no. 3, pp. 8–11. (In Russ.).
6. Epishin A.Yu., Zainullin L.A., Karelin V.G. Study of firing of Lisakovsk iron ore concentrate to determine the decomposition temperature of hydrated phosphate mineral. In: *Materialy Desyatoy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i spetsialistov* [Materials of 10th All-Russian Sci.-Pract. Conf. of Students, Postgraduates and Specialists]. Magnitogorsk: 2009, pp. 144–147. (In Russ.).

7. Epishin A.Yu., Zainullin L.A., Karelin V.G. Dephosphorization of hematites by leaching with preliminary firing. In: *Sbornik materialov Vos'mogo kongressa obogatitelei stran SNG* [Coll. of materials of 8th Congress of Dressers of CIS Countries]. Moscow: 2011, pp. 83–86. (In Russ.).
 8. Levintov B.L., Mirko V.A., Pchelintseva O.A. Status and prospects of solving the problem of dephosphoration of refractory iron ore raw materials of Kazakhstan. In: *Sozdanie nauchnykh osnov printsiipal'no novykh khimicheskikh i metallurgicheskikh tekhnologii, adaptirovannykh k syr'evoi baze Kazakhstana* [Creation of scientific bases of essentially new chemical and metallurgical technologies adapted to a source of raw materials of Kazakhstan]. Almaty: Kompleks, 2003, pp. 137–142. (In Russ.).
 9. Pchelintseva O.A., Mazhrenova N.R., Levintov B.L. On the possibility of radiation stimulation of dephosphorization process of Lisakovsk concentrates. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2003, no. 3, pp. 57. (In Russ.).
 10. Levintov B.L., Mirko V.A., Kantemirov M.D., Klimushkin A.N., Naidenov V.A., Bobir A.V. Structure of oolitic brown iron ores and their influence on the thermochemical enrichment of Lisakovsk concentrates. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 8, pp. 681–685.
 11. Kovzun I.G., Ul'berg Z.R., Protsenko I.T. etc. *Sposob ochistki zhelezosoderzhashchego materiala ot mysh'yaka i fosfora* [Way of purification of ferriferous material of arsenic and phosphorus]. Patent RF no. 2413012. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 6. (In Russ.).
 12. Belikov V.V., Ogorodov V.B., Yadryshnikov A.O. etc. *Sposob ochistki zhelezorudnogo kontsentrata ot primesi fosfora* [Way of cleaning of iron ore concentrate of phosphorus impurity]. Patent RF no. 2184158. *Byulleten' izobretenii*. 2002, no. 18. (In Russ.).
 13. Belikov V.V., Ogorodov V.B., Yadryshnikov A.O., Mikhailovna N.A., Dephosphorization of hematite ores and concentrates. *Obogashchenie rud*. 2003, no. 3, pp. 8–12. (In Russ.).
 14. Naydyonov V.A. Experience of operation of Lisakovsk deposit of brown iron ore. In: *International Seminar on Vision Mineral Development. Bhubaneswar, India, 2005*, pp. 83–87. (In Russ.).
 15. Karelin V.G., Rezvov G.A. Features of dehydration of Lisakovsk materials. In: *Sbornik tezisov soveshchaniya "Problemy obogashcheniya i kompleksnoi pererabotki fosforistykh lisakovskikh rud"* [Abstracts of the meeting "Problems of enrichment and complex processing of Lisakovsk phosphorous ore"]. Temirtau: 1979, pp. 38–39. (In Russ.).
 16. Karelin V.G., Rezvov G.A., Kuzovnikova E.A. Kinetic features of dehydration of Lisakovsk concentrate in the boiling layer. *Metallurgicheskaya teplotekhnika*. 1975, no. 4, pp. 153–156. (In Russ.).
 17. Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. *Termicheskii analiz mineralov i gornykh porod* [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad: Nedra, 1974, 399 p. (In Russ.).
 18. Wendlandt Wesley Wm. *Thermal methods of analysis*. New York: Interscience Publishers, 1964, 424 p. (Russ.ed.: Wendlandt W. *Termicheskie metody analiza*. Moscow: Mir, 1978, 526 p.).
 19. Shestak Ya. *Teoriya termicheskogo analiza* [Theory of thermal analysis]. Moscow: Mir, 1987, 456 p. (In Russ.).
 20. Delmon Bernard. *Introduction à la Cinétique Hétérogène*. Ed. Technip. Paris 1969. (Russ.ed.: Delmon B. *Kinetika geterogennykh reaktivnosti*. Moscow: Mir, 1972, 554 p.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.
- Information about the authors:**
- V.G. Karelin**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of Granulation of Metallurgical Melts (karelin@lab62.vniimt.ru)
L.A. Zainullin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director (aup@vniimt.ru)
A.Yu. Epishin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Granulation of Metallurgical Melts (epishin.artem@yandex.ru)

Received April 12, 2017