

Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 12. С. 555–562
Thermal processes in engineering, 2022, vol. 14, no. 12, pp. 555–562

Научная статья
УДК 536.27
DOI: 10.34759/tpt-2022-14-12-555-562

Особенности исследования термической деструкции карбонатов в окомкованных фосфоритах при высокотемпературном обжиге

В.А. Орехов^{1✉}, В.И. Бобков¹

¹ Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия
fundukoff@mail.ru[✉]

Аннотация. Исследуется химико-энерготехнологический процесс деструкции карбонатов в фосфоритовых окатышах с учетом тепловых и технологических особенностей функционирования обжиговых конвейерных машин. Экспериментально исследована прокалка окомкованного фосфоритового сырья с использованием сохраняющих исходную структуру образцов в диапазоне температур и скоростей нагрева действующих конвейерных обжиговых машин. Экспериментально обосновано возникновение значительных градиентов температур в исследуемых образцах, связанное с нестационарными условиями нагрева и действием тепловых эффектов реакции диссоциации карбонатов, что ограничивает возможность использования существующих методов неизотермической кинетики для определения вида и параметров кинетических уравнений. Обнаружена взаимосвязь между гетерогенными эндотермическими превращениями и теплофизическими условиями прокалки.

Ключевые слова: температура, нагрев, фосфоритовый окатыш, обжиг, спекание, деструкция карбонатов, структура материала

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-61-00096.

Для цитирования. Орехов В.А., Бобков В.И. Особенности исследования термической деструкции карбонатов в окомкованных фосфоритах при высокотемпературном обжиге // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 12. С. 555–562. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-12-555–562

Original article

Specifics of carbonates thermal destruction studies in pelleted phosphorites while high-temperature firing

V.A. Orekhov^{1✉}, V.I. Bobkov¹

¹ Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, Russia
fundukoff@mail.ru[✉]

Abstract. The presented work studies the chemical-energy-technological process of carbonates destruction in phosphorite pellets with account for both thermal and technological specifics of the

firing conveyor machines. Baking of pelleted phosphorite raw material was studied experimentally employing samples retaining their initial structure within the range of temperatures and heating rates in the acting firing conveyor machines. Significant temperature gradients origination in the samples under study associated with non-stationary heating conditions and impact of thermal effects of carbonates dissociation reaction, which limits the possibility of the non-isothermal kinetics conventional methods application for both type and parameters determining of kinetic equations, was substantiated experimentally. The interaction between heterogeneous endothermic transformations and thermo-physical baking conditions was revealed.

Keywords: temperature, heating, phosphorite pellet, firing, sintering, carbonates destruction, material structure

Funding. The reported study was funded by RSF according to the research project–22-61-00096.

For citation. Orekhov V.A., Bobkov V.I. Specifics of carbonates thermal destruction studies in pelleted phosphorites while high-temperature firing. *Тепловые процессы в технике = Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 12, pp. 555–562. (In Russ.) DOI: 10.34759/tpt-2022-14-12-555-562

Введение

Прогнозирование пригодности фосфоритового сырья для нужд термической обработки, выбор энергоресурсоэффективных технологических схем, режимов функционирования и адаптация к периодически изменяющимся свойствам фосфорсодержащего рудного сырья затруднены в связи с отсутствием методик расчета процессов термической подготовки и переработки, достаточно полно учитывающих специфические особенности и свойства фосфоритового сырья. В настоящее время практически отсутствуют достоверные данные о кинетике термической деструкции карбонатов, без которых невозможно проведение количественных расчетов химико-энерготехнологических процессов в промышленных установках обжига и руднотермических печах. Фосфорсодержащие руды и породы имеют сложный и неоднородный полиминеральный состав. Породообразующие минералы при нагревании претерпевают физико-химические превращения, вступают во взаимные реакции, что приводит к изменениям состава и структуры материалов, проявлению тепловых эффектов и в конечном итоге сопровождается глубокими изменениями теплофизических характеристик (ТФХ) – теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности. Поскольку термически активируемые химико-энерготехнологические процессы определяются кинетическими закономерностями и зависят от условий нагрева, то и ТФХ фосфорсодержаще-

го рудного сырья приобретают сложный, температурно-временной или температурно-концентрационный характер зависимостей.

Особые трудности методического характера возникают и при изучении кинетики прокалики кускового и окомкованного фосфорсодержащего сырья, так как результаты исследований отягощаются процессами теплообмена в образцах.

Недостаточная изученность кинетики деструкции карбонатов фосфорсодержащего рудного сырья, отсутствие данных о влиянии химического и минералогического состава, а также структуры материала и скорости нагрева образцов на процесс прокалики не позволяют использовать имеющиеся в литературе результаты термоаналитических исследований отдельных типов фосфоритового сырья и «чистых» карбонатных минералов для описания процесса прокалики фосфорсодержащего сырья [1–3]. Поэтому для установления общих закономерностей химико-энерготехнологического процесса прокалики требуется экспериментальное изучение процессов диссоциации карбонатов с использованием образцов, которые сохраняли бы исходную структуру материала в диапазоне температур, близких к имеющимся на практике [4, 5]. Например, в зоне высокотемпературного обжига фосфоритовых окатышей на конвейере обжиговой машины или в спекаемом слое на ленте агломерационной машины [6, 7].

Первое условие накладывает ограничение на минимальные размеры и форму образцов. Раз-

меры образцов во всех экспериментах должны существенно превышать размеры зерен порообразующих минералов или характерный размер структуры исследуемого материала [8, 9]. Форма образца должна выбираться исходя из минимизации искажающего влияния механической активации поверхностных включений, то есть отношение поверхности образца к его объему должно быть по возможности минимальным [10, 11].

Второе условие может быть выполнено при проведении экспериментов с высокими скоростями нагрева. Проведенный авторами анализ зондирования действующих на горно-обогачительных предприятиях промышленных установок обжига показывает, что в реальных условиях скорость нагрева изменяется в широких пределах и может достигать $2000\text{--}2500\text{ К}\cdot\text{ч}^{-1}$.

Одновременное выполнение указанных условий может привести к возникновению значительных градиентов температур в исследуемых образцах, связанных с нестационарными условиями нагрева и действием тепловых эффектов реакции диссоциации карбонатов [12, 13]. Это ограничит возможность использования существующих методов неизотермической кинетики для определения вида и параметров кинетических уравнений [14, 15].

Цель исследования: оценить теплофизические условия, сопутствующие гетерогенным эндотермическим процессам в исследуемых фосфорсодержащих рудных материалах, определить возможность использования существующих методов для корректного анализа этих процессов.

Моделирование термической деструкции карбонатов в фосфоритовых окатышах

При выборе математической модели, описывающей процесс деструкции карбонатов, существенными являются следующие факторы:

нестационарные температурные условия, сопутствующие химико-энерготехнологическим процессам;

зависимость теплофизических характеристик материала как от температуры, так и от степени превращения реагирующих компонентов.

При этом делались следующие допущения и предположения:

диффузия газообразного продукта происходит беспрепятственно и не оказывает влияния на скорость реакции;

температурная зависимость скорости реакции носит аррениусовский характер;

удельные теплоты химических превращений не зависят от температуры.

К числу термически активируемых процессов деструкции карбонатов, имеющих практическое значение при термической подготовке рудного сырья, следует отнести эндотермические реакции диссоциации карбонатов: $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 - Q_1$ и $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - Q_2$, которые требуют значительных затрат тепловой энергии. Здесь $Q_1 = 1.21 \cdot 10^5$ Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения MgCO_3 ; $Q_2 = 1.78 \cdot 10^5$ Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения CaCO_3 .

При проведении кинетического анализа топочимических реакций обычно используется реакционная переменная α , представляющая собой отношение

$$\alpha = (G_0 - G(\tau))/G_0 = 1 - G(\tau)/G_0,$$

где G_0 – количество вещества, вступающего в реакцию; $G(\tau)$ – количество прореагировавшего вещества за время τ .

Поля градиентов температур в исследуемых образцах, вызванные нестационарными условиями нагрева и проявлением тепловых эффектов химических превращений, могут быть определены из решений уравнения теплопроводности с тепловыми стоками и соответствующими краевыми условиями [16, 17].

С учетом основных требований и допущений математическая формулировка задачи в одномерной постановке для окатыша имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C_p(T, \alpha_1, \alpha_2) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T, \alpha_1, \alpha_2) x^2 \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \\ - C_1^0 Q_1 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} - C_2^0 Q_2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{R_0 T}\right) (1 - \alpha_1)^{2/3}; \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} = k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{R_0 T}\right) (1 - \alpha_2)^{2/3}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь $C_{1,2}^0$ – теплоемкости веществ прореагировавших карбонатов; $E_{1,2}$ – энергии активации реакции диссоциации карбонатов; $k_{01,2}$ – предэкспоненциальные множители; α_1 – степень превращения $MgCO_3$; α_2 – степень превращения $CaCO_3$; $\rho C_p(T, \alpha_1, \alpha_2)$, $\lambda(T, \alpha_1, \alpha_2)$ – теплофизические характеристики, а именно удельные теплоемкость и теплопроводность, зависящие от температуры и степеней превращения реакций диссоциации карбонатов.

Система уравнений решалась численно при следующих краевых условиях:

начальные условия

$$T(x, 0) = T_0; \quad \alpha_1(x, 0) = 0; \quad \alpha_2(x, 0) = 0; \quad (2)$$

граничные условия второго и первого рода

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad T(R, \tau) = T_n(\tau), \quad (3)$$

где $T(x, \tau)$ – температура окатыша, зависящая от координаты по радиусу окатыша $x \in [0; R]$ и времени τ , R – радиус окатыша.

Решение приведенной системы уравнений осуществлялось методом прогонки по неявной конечно-разностной схеме.

Однако ввиду отсутствия обоснованных данных по температурно-временной зависимости ТФХ для фосфорсодержащего сырья, а также по кинетике термической деструкции карбонатов, которая определяется плотностью теплового стока от температуры, координаты и времени, расчетное определение величин температурных перепадов возможно весьма приближенно [18, 19].

Постановка эксперимента

Для определения температурных перепадов использовались образцы прокаливаемого фосфорсодержащего рудного сырья, содержащие 29 % карбонатов. В зависимости от условий нагрева и качественной оценки режима гетерогенной реакции разложения карбонатных включений проведена прокатка сферического образца (окатыша) радиусом $R = 0.015$ м с равномерно распределенными по объему карбонатными включениями на термовесовой установке с одновременной регистрацией потери веса и температурного распределения в образцах.

Прокалка проводилась при линейном повышении температуры поверхности образца со скоростями $b_1 = 0.14$ К·с⁻¹, $b_2 = 0.42$ К·с⁻¹. Результаты экспериментов приведены на рис. 1, 2.

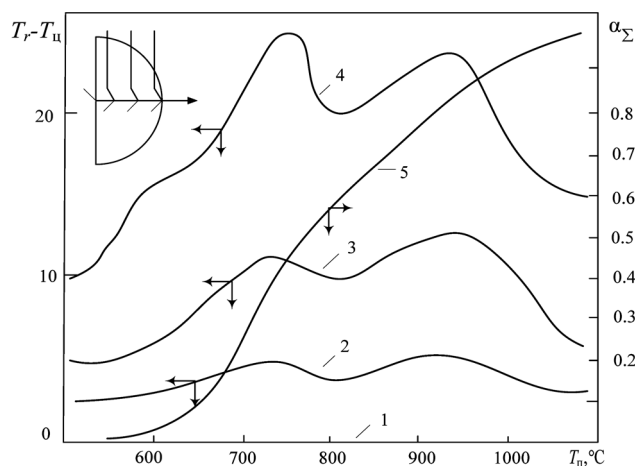


Рис. 1. Перепады температур в сферическом окатыше фосфорита. Скорость нагрева $b = 0.14$ К/с; 1–4 – показания дифференциальных термометров; 5 – степень превращения образцов

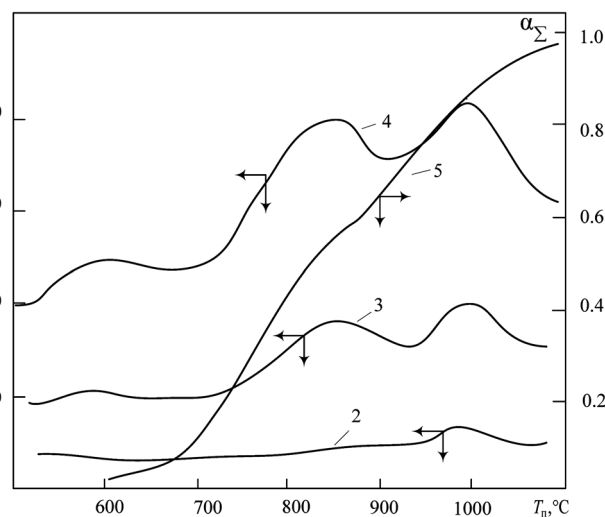


Рис. 2. Перепады температур в сферическом окатыше фосфорита. Скорость нагрева $b = 0.42$ К·с⁻¹; 2–4 – показания термометров; 5 – степень превращения

Перепады температур в объеме сферического окатыша $T_r - T_n$, измеренные четырьмя дифференциальными термоэлектрическими термометрами (в центре $T_1 = T_n$, на расстоянии 5 мм от центра T_2 – линия 2, на расстоянии 10 мм от центра T_3 – линия 3, на поверхности окатыша $T_4 = T_n$ – линия 4), отнесены к температуре поверхности. Потеря веса образцов представлена в координатах: температура поверхности окатыша – средняя по координате суммарная степень превращения α_Σ , которая определялась из зависимости

$$\alpha_\Sigma = (G_c - G(T_n)) / (G_c - G_{от}),$$

где G_c , $G_{от}$ – вес образца в сыром и нацело отожженном состоянии соответственно; $G(T_n)$ –

текущий вес образца, приведенный к температуре поверхности.

На рис. 3 приведено распределение температур по радиусу окатыша, соответствующие моментам: до начала реакции диссоциации карбонатов (квазистационарный режим нагрева) и при интенсивном протекании процесса деструкции карбонатов.

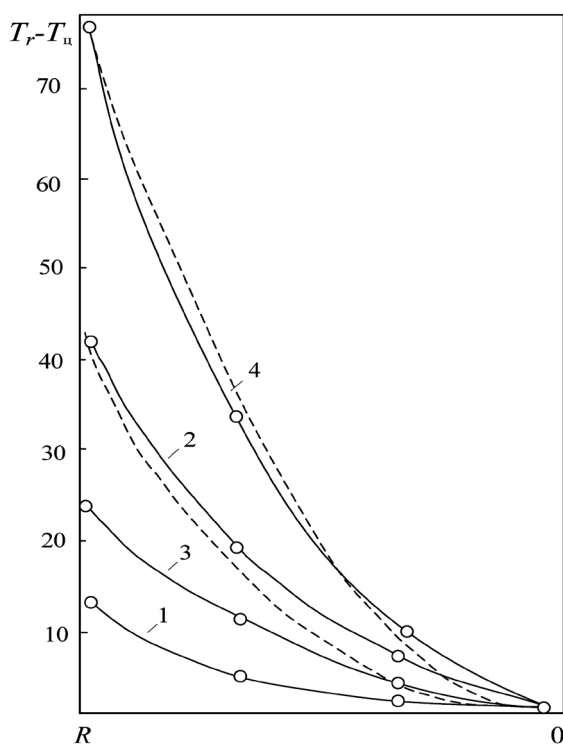


Рис. 3. Распределение температур в сферическом фосфоритовом окатыше до начала реакции (кривые 1, 3 при $T_n = 550$ °C) и во время реакции (кривые 2, 4 при $T_n = 750$ °C). Скорости нагрева поверхности: $b = 0.14$ K·c⁻¹ (кривые 1, 2), $b = 0.42$ K·c⁻¹ (кривые 3, 4)

Сравним экспериментальные температурные распределения с теоретическими (пунктирные линии на рис. 3), которые, как следует из известного решения уравнения теплопроводности шара для квазистационарного режима нагрева, имеют вид параболы.

Анализ и обсуждение результатов

Из сопоставления температурных распределений следует, что с момента наступления квазистационарного режима нагрева и до начала реакции диссоциации карбонатов в окатыше наблюдается распределение температур, близкое к параболическому. При этом температурный перепад несколько возрастает с повышением температуры [20–22]. При появлении убыли

веса образца температурный перепад резко увеличивается и проходит через два максимума. Характерно, что вид температурного распределения не претерпевает значительных искажений. Градиенты температур по окончании реакции диссоциации карбонатов выше, чем в необожженном образце.

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие основные выводы и научно обоснованные предположения:

прокалка фосфоритовых окатышей, соответствующих по размерам сырым окатышам, сходным с окомкователя, и при скоростях нагрева действующих конвейерных обжиговых машин при обжиге, а также реализуемых в практике термоаналитических исследований, протекает при значительных температурных градиентах;

деструкция карбонатов в фосфорсодержащем сырье протекает в основном в два этапа, при этом процесс охватывает весь образец или, по крайней мере, достаточно широкую область, о чем свидетельствует отсутствие излома на кривой температурного распределения, характерного для фазовых превращений, происходящих на поверхности или узкой области и сопровождающихся значительным поглощением тепловой энергии;

нагрев фосфоритового материала и происходящие в нем физико-химические превращения сопровождаются существенными изменениями теплофизических характеристик.

Очевидно, что в принятых условиях нагрева изменение теплофизических свойств фосфорсодержащего сырья приводит к изменению условий внутреннего теплообмена реагирующего образца и тем самым оказывает влияние на динамику гетерогенного превращения.

Обнаружено влияние скорости нагрева поверхности окатышей на макрокинетику термической деструкции карбонатов. Расчеты, проведенные по представленной модели при различных скоростях нагрева [23], показывают, что с повышением скорости нагрева и соответственно увеличением градиентов температур неоднородность концентраций реагирующих карбонатов также возрастает [24]. Образование неоднородного поля концентраций и наличие градиентов температур в окатыше способствуют формированию экстремального распределения скорости реакции диссоциации карбонатов, максимум которой перемещается вглубь ока-

тыша по мере протекания реакции. Характерно, что максимум, через который проходят локальные скорости реакции тем ниже, чем дальше соответствующая точка отстоит от поверхности окатыша [25]. Значения максимумов скорости реакции возрастают с увеличением скорости нагрева, что способствует повышению градиентов температур в окатыше.

Заключение

Экспериментально исследован химико-энерготехнологический процесс прокалики окомкованного фосфоритового сырья с использованием сохраняющих исходную структуру образцов в диапазоне температур зоны высокотемпературного обжига действующих конвейерных обжиговых машин. При проведении экспериментов учитывалась широкая вариация скоростей нагрева фосфоритовых окатышей на конвейере обжиговой машины. Установлено появление значительных градиентов температур в исследуемых образцах, связанных с нестационарными условиями нагрева и действием тепловых эффектов реакции диссоциации карбонатов, что ограничивает возможность использования существующих методов неизотермической кинетики для определения вида и параметров кинетических уравнений. Обнаружена связь между теплофизическими условиями прокалики и сопутствующими гетерогенными эндотермическими превращениями. Определена возможность использования существующих методов для корректного анализа этих химико-энерготехнологических процессов.

Численные исследования математической модели процесса прокалики свидетельствуют о значительном влиянии внутреннего теплообмена и параметров кинетического уравнения на протекание реакции диссоциации карбонатов.

Процесс прокалики фосфорсодержащего сырья может рассчитываться с использованием представленной модели в широком диапазоне скоростей нагрева окатышей на колосниковой решетке действующих обжиговых конвейерных машин, что позволит определять оптимальные режимы процесса прокалики.

Список источников

1. **Бобков В.И.** Особенности тепловых процессов при агломерации фосфатного сырья // *Тепловые процессы в технике*. 2017. Т. 9. № 1. С. 40–46.
2. **Бобков В.И.** Моделирование термически активируемых процессов обжига окомкованного сырья // *Тепловые процессы в технике*. 2016. Т. 8. № 1. С. 42–47.
3. **Nayak D., Ray N., Dash N., Rath S., Pati S., De P.S.** Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application. *Powder Technology*, 2021, vol. 380, pp. 408–420.
4. **Бобков В.И.** Особенности электропроводности и структуры фосфоритов при высокотемпературном нагреве // *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 77–83.
5. **Wang S., Guo Y., Zheng F., Chen F., Yang L.** Improvement of roasting and metallurgical properties of fluorine-bearing iron concentrate pellets. *Powder Technology*, 2020, vol. 376, pp. 126–135.
6. **Hu X., Brandani S., Benin A.I., Willis R.R.** Testing the stability of novel adsorbents for carbon capture applications using the zero length column technique. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 406–413.
7. **Li J., An H.-F., Liu W.-X., Yang A.-M., Chu M.-S.** Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 239–247.
8. **Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D., Xue Y.** Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and Its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties. *Minerals, Metals and Materials Series. 11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 2020, vol. 1, pp. 857–866.
9. **Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A.** Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 600–603.
10. **Коссо́й А.А., Лопати́н А.В.** Реакционная calorиметрия: основные типы, простая теория и применение для исследования кинетики реакций // *Химическая промышленность*. 2020. Т. 97. № 4. С. 188–198.
11. **Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B.** Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 573–577.
12. **Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A.** On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23.
13. **Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A.** Change of equivalent layer porosity of pellets along the length of burning conveyor machine. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 116–123.
14. **Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спи́рин Н.А., Лавров В.В.** Математическая модель процесса обжига рудугольных окатышей на конвейерной машине // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2018. Т. 60. № 4. С. 329–335.
15. **Novichikhin A.V., Shorokhova A.V.** Procedures for stage processing of iron-ore wastes in industrial mining areas. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 565–572.
16. **Kossov A.** Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, vol. 143, no. 1, pp. 599–608.
17. **Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П.** Исследование тепловых характеристик фосфатного сырья

- в диапазоне температур обжига // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 3. С. 295–300.
18. **Tian Y., Qin G., Zhang Y., Zhao L., Yang T.** Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*, 2020, vol. 1, pp. 91–102.
 19. **Yaroshenko Y.G.** Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no. 8, pp. 505–516.
 20. **Yang C.-C., Zhu D.-Q., Pan J., Zhou B.-Z., Xun H.** Oxidation and Induration Characteristics of Pellets Made from Western Australian Ultrafine Magnetite Concentrates and Its Utilization Strategy. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 924–932.
 21. **Бенин А.И., Коссои А.А.** Система обеспечения термической безопасности объектов применения высокоэнергоемких химических веществ // Восьмые Уткинские чтения. Труды Общероссийской научно-технической конференции. Серия «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». Санкт-Петербург, 2019. С. 30–34.
 22. **Wang L., Liu W., Hu J., Liu Q., Yue H., Liang B., Zhang G., Luo D., Xie H., Li C.** Indirect mineral carbonation of titanium-bearing blast furnace slag coupled with recovery of TiO₂ and Al₂O₃. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 583–592.
 23. **Ильин И.В., Левина А.И., Калязина С.Е.** Function-oriented approach to mining enterprise automation // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 5–19. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-5-19
 24. **Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимнов Н.Н.** Компьютерная программа для моделирования показателей технического состояния электромеханических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 105–119. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-105-119
 25. **Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П.** Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 55–68. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-55-68
 7. **Li J., An H.-F., Liu W.-X., Yang A.-M., Chu M.-S.** Effect of basicity on metallurgical properties of magnesium fluxed pellets. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, no. 3, pp. 239–247.
 8. **Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D., Xue Y.** Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and Its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties. *11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 2020, vol. 1, pp. 857–866.
 9. **Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A.** Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, vol. 8, no. 11, pp. 600–603.
 10. **Kossoi A.A., Lopatin A.V.** Reaktsionnaya kalorimetriya: osnovnye tipy, prostaya teoriya i primeneniye dlya isledovaniya kinetiki reaktsii [Reaction Calorimetry: Main Types, Simple Theory, and Applications to Study Reaction Kinetics]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2020, vol. 97, no. 4, pp. 188–198. (In Russ.)
 11. **Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B.** Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 2018, vol. 48, no. 9, pp. 573–577.
 12. **Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A.** On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23.
 13. **Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A.** Change of equivalent layer porosity of pellets along the length of burning conveyor machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 116–123.
 14. **Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V.** Matematicheskaya model' protsessa obzhiga rudougol'nykh okatyshei na konveiernoi mashine [Mathematical model of the process of roasting coal ore pellets on a conveyor machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 2018, vol. 60, no. 4, pp. 329–335. (In Russ.)
 15. **Novichikhin A.V., Shorokhova A.V.** Procedures for stage processing of iron-ore wastes in industrial mining areas. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 565–572.
 16. **Kossoy A.** Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, vol. 143, no. 1, pp. 599–608.
 17. **Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P.** Issledovanie teplovykh kharakteristik fosfatnogo syr'ya v diapazone temperatur obzhiga. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 295–300.
 18. **Tian Y., Qin G., Zhang Y., Zhao L., Yang T.** Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials*. 2020, vol. 1, pp. 91–102.
 19. **Yaroshenko Y.G.** Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, no. 8, pp. 505–516.
 20. **Yang C.-C., Zhu D.-Q., Pan J., Zhou B.-Z., Xun H.** Oxidation and Induration Characteristics of Pellets Made from Western Australian Ultrafine Magnetite Concentrates and Its Utilization Strategy. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2017, vol. 23, no. 9, pp. 924–932.
 21. **Benin A.I., Kossoi A.A.** Sistema obespecheniya termicheskoi bezopasnosti ob'ektov primeneniya vysokoenergoemkikh khimicheskikh veshchestv [System for ensuring thermal safe-

References

1. **Bobkov V.I.** Features of thermal processes during the agglomeration of phosphate raw materials. *Thermal Processes in Engineering*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 40–46. (In Russ.)
2. **Bobkov V.I.** Modeling of thermally activated processes of roasting pelletized raw materials. *Thermal Processes in Engineering*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 42–47. (In Russ.)
3. **Nayak D., Ray N., Dash N., Rath S., De P.S.** Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application. *Powder Technology*, 2021, vol. 380, pp. 408–420.
4. **Bobkov V.I.** Features of the electrical conductivity and structure of phosphorites during high-temperature heating. *Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 1–2, pp. 77–83. (In Russ.)
5. **Wang S., Guo Y., Zheng F., Chen F., Yang L.** Improvement of roasting and metallurgical properties of fluorine-bearing iron concentrate pellets. *Powder Technology*, 2020, vol. 376, pp. 126–135.
6. **Hu X., Brandani S., Benin A.I., Willis R.R.** Testing the stability of novel adsorbents for carbon capture applications using the zero length column technique. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 406–413.

- ty of objects using high-energy chemicals]. *Vos'mye Utkinskie chteniya. Trudy Obshcherossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Seriya "Biblioteka zhurnala "Voenmekh. Vestnik BGTU"*. Saint Petersburg, 2019, pp. 30–34. (In Russ.)
22. Wang L., Liu W., Hu J., Liu Q., Yue H., Liang B., Zhang G., Luo D., Xie H., Li C. Indirect mineral carbonation of titanium-bearing blast furnace slag coupled with recovery of TiO₂ and Al₂O₃. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 583–592.
23. П'ин I.V., Levina A.I., Kalyazina S.E. Function-oriented approach to mining enterprise automation. *Prikladnaya informatika*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 5–19. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-5-19
24. Kurilin S.P., Sokolov A.M., Prokimmov N.N. Komp'yuternaya programma dlya modelirovaniya pokazatelei tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh sistem [Computer program for modeling indicators of the technical condition of electromechanical systems]. *Prikladnaya informatika*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 105–119. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-105-119. (In Russ.)
25. Puchkov A.Yu., Lobaneva E.I., Kulygin O.P. Algoritm prognozirovaniya parametrov sistemy pererabotki otkhodov apatit-nefelinovykh rud [Algorithm for Predicting the Parameters of the Apatite-Nepheline Ores Waste Processing System]. *Prikladnaya informatika*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 55–68. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-55-68. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 09.11.2022; принята к публикации 14.11.2022.

The article was submitted on 10.10.2022; approved after reviewing on 09.11.2022; accepted for publication on 14.11.2022.