

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 167–173  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 167–173

Научная статья  
УДК 536.27  
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-167-173

## Влияние условий внутреннего теплообмена на процесс термического разложения карбонатов в фосфорсодержащем сырье

В.А. Орехов<sup>1</sup>✉, В.И. Бобков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске (филиал), Смоленск, Россия  
✉ fundukoff@mail.ru

**Аннотация.** Рассматривается влияние скорости нагрева фосфорсодержащего сырья на химико-энерготехнологические процессы термической диссоциации карбонатов, протекающие при его высокотемпературном обжиге. Исследование проводилось для диапазонов температур действующих обжиговых и агломерационных машин с учетом макрокинетики процессов прокалики. Обнаружено существенное влияние скорости нагрева образцов фосфоритных руд на кинетику термического разложения карбонатов. Авторами предложена математическая модель, позволяющая учесть широкий диапазон изменения параметров кинетических уравнений химико-энерготехнологических процессов диссоциации карбонатов. Проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на выявление зависимости между скоростью нагрева фосфорсодержащих рудных образцов и эволюцией полей концентрации карбонатов, скоростей превращения и градиентов температуры. Результаты исследований могут быть использованы для выработки оптимальных с точки зрения энергоресурсоэффективности режимов функционирования агломерационных и обжиговых конвейерных машин.

**Ключевые слова:** фосфорсодержащая руда, обогащение руды, обжиг, диссоциация карбонатов, термическое разложение, теплообмен

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-11-00335.

**Для цитирования.** Орехов В.А., Бобков В.И. Влияние условий внутреннего теплообмена на процесс термического разложения карбонатов в фосфорсодержащем сырье // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 167–173. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-167-173

Original article

## Internal heat exchange effect on the thermal decomposition of carbonates in the phosphorus-containing raw materials

V.A. Orekhov<sup>1</sup>✉, V.I. Bobkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, Russia  
✉ fundukoff@mail.ru

**Abstract.** The article considers the effect of Phosphorus-Containing Raw Materials heating rate on the chemical-energy-technological processes of carbonates thermal dissociation being in progress while its high-

© Орехов В.А., Бобков В.И., 2023

temperature firing. The study was being conducted for the temperature ranges of the existing roast and sintering machines with account for micro-kinetics of the baking processes. Significant effect of the phosphatic rocks samples heating rate on the carbonates thermal decomposition kinetics was revealed. The authors proposed mathematical model that allows accounting for the wide range of kinetic equations parameters changing of chemical-energy-technological processes of carbonates dissociation. A series of computational experiments aimed at revealing dependencies between the phosphor-containing ore samples heating rate and evolution of carbonates concentration fields, transformation rate and temperature gradients was performed. The results of the study may be applied for elaborating optimal functioning modes of sintering and firing machines from the viewpoint energy-resource effectiveness.

**Keywords:** phosphorus-containing ore, ore enrichment, firing, dissociation of carbonates, temperature, thermal decomposition, heat-mass exchange

**Funding.** The reported study was supported by the RSF according to the research project № 22-11-00335.

**For citation.** Orekhov V.A., Bobkov V.I. Internal heat exchange effect on the thermal decomposition of carbonates in the phosphorus-containing raw materials. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 167–173. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-167-173

### Введение

В настоящее время в России значимым направлением развития промышленного производства является создание и внедрение энерго-ресурсосберегающих технологий [1–3]. Очевидно, что наиболее эффективно данные технологии могут быть применены в потребляющих минеральные ресурсы отраслях, к которым, в частности, относится горнообогатительная отрасль [4, 5]. С одной стороны, это обусловлено наличием жесткой конкуренции на рынке фосфоритового сырья, которая побуждает обогатительные предприятия сокращать издержки производства и повышать качество продукции [6, 7]. Термическое разложение карбонатов в обжиговых и агломерационных машинах позволяет использовать недефицитное топливо для повышения технологических свойств фосфорсодержащего рудного сырья, что способствует снижению топливно-энергетических затрат в последующем переделе [8, 9]. С другой стороны, важным фактором, определяющим необходимость внедрения новых технологий, является удорожание тепловой и электрической энергии, затрачиваемой на термическую подготовку сырья, что в свою очередь приводит к общему повышению затрат на производство [10, 11]. На сегодняшний день актуальной задачей является поиск оптимальных с точки зрения энергоресурсоэффективности режимов функционирования обжиговых конвейерных и агломерационных машин для обжига фосфоритового сырья. Определение данных режимов осуществляется с помощью создания масштабных математических

моделей, учитывающих основные химико-энерготехнологические и тепломассообменные процессы, которые протекают в динамическом слое агломерационных и обжиговых конвейерных машинах [12–14].

Целью работы является исследование влияния скорости нагрева и констант химической реакции диссоциации карбонатов на макрокинетику процесса термической декарбонизации. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для формирования энерго-ресурсоэффективных режимов термической подготовки фосфорсодержащего рудного сырья в обжиговых и агломерационных машинах.

### Математическая модель процесса термической диссоциации карбонатов

Исследование взаимопределяющего характера теплообмена и кинетики гетерогенного превращения в фосфорсодержащем рудном сырье при высокотемпературном обжиге проводилось с помощью построения математической модели, учитывающей наиболее существенные явления, а также анализа решений, полученных тем или иным способом [15, 16].

При построении модели, описывающей процесс декарбонизации, были выделены следующие наиболее существенные факторы:

- нестационарные температурные условия, сопутствующие химико-энерготехнологическим процессам;
- зависимость теплофизических характеристик фосфоритового сырья 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 диссоциации карбонатов;
- температурная зависимость скорости реакции носит аррениусовский характер;
- удельные теплоты химических превращений не зависят от температуры.

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

$$\left\{ \begin{aligned} &\rho C_p(T, \alpha_1, \alpha_2) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T, \alpha_1, \alpha_2) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \\ &- C_1^0 Q_1^0 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} - C_2^0 Q_2^0 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau}; \\ &\frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} = k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) f_1(\alpha_1); \\ &\frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} = k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) f_2(\alpha_2). \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Здесь:  $\rho C_p(T, \alpha_1, \alpha_2)$ ,  $\lambda(T, \alpha_1, \alpha_2)$  – теплофизические характеристики удельные теплоемкость и теплопроводность, зависящие от температуры и степеней превращения эндотермических реакций диссоциации карбонатов:  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 - Q_1$  и  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - Q_2$ , где  $Q_1 = 1,21 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции разложения  $MgCO_3$ ,  $Q_2 = 1,78 \cdot 10^5$  Дж/моль – тепловой эффект реакции

разложения  $CaCO_3$ .

Система уравнений решалась численно при наличии следующих краевых условий:

– начальные условия:

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

– граничные условиями первого рода:

$$T(X, \tau) = T_1(\tau); \quad T(-X, \tau) = T_2(\tau), \quad (3)$$

где  $T_1, T_2$  – температуры на поверхностях неограниченной пластины. Решение приведенной системы уравнений осуществлялось методом прогонки по неявной конечно-разностной схеме.

### Вычислительный эксперимент и анализ результатов

Вычислительные эксперименты проводились для пластины с полутолщиной  $X = 4 \cdot 10^{-3}$  м с использованием разработанной авторами компьютерной модели [17, 18], реализующей решение системы уравнений (1) при наличии краевых условий (2) и (3). Во всех вариантах расчета значения теплофизических характеристик выбирались в соответствии с их зависимостями от температуры, представленными в ранее опубликованной работе авторов [19].

Исходные данные к вариантам расчетов приведены в таблице 1.

Результаты расчетов представлены графически для трех значений средней степени превращения:  $\bar{\alpha} = 0,25$ ,  $\bar{\alpha} = 0,5$ ,  $\bar{\alpha} = 0,75$ .

Влияние скорости нагрева  $b$  образцов на эволюцию поля концентраций, поля скоростей превращения и поля градиентов температуры приведены на рис. 1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 1. Исходные данные к вариантам расчетов

№	$b, K \cdot c^{-1}$	$b \cdot X^2/a$	$E/R \cdot 10^3$	$k_0, c^{-1}$	$Q^0 C^0 \cdot 10^{-2}$	$n$	Примечание
1	0,278	19,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	2/3	Оценка влияния скорости нагрева
2	1,11	78,3	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	2/3	
3	2,22	156,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	2/3	
4	0,278	19,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	0,1	Оценка влияния вида функции $f(\alpha)$
5	0,278	19,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	1,0	
6	0,278	19,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	3,0	
7	0,278	19,6	12,6	$0,124 \cdot 10^4$	0,144	2/3	Оценка влияния энергии активации
8	0,278	19,6	25,3	$0,378 \cdot 10^9$	0,144	2/3	
9	0,278	19,6	50,5	$0,35 \cdot 10^{20}$	0,144	2/3	

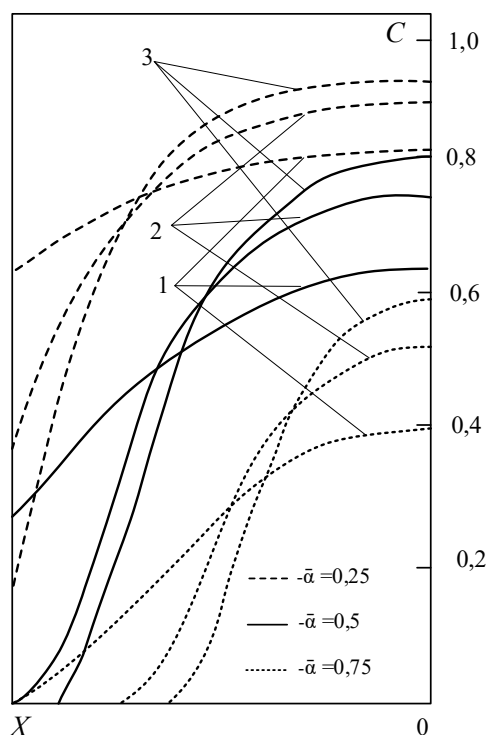


Рис. 1. Влияние скорости нагрева на эволюцию поля концентраций. Нумерация кривых соответствует номеру в табл. 1, для скорости нагрева  $b$ .

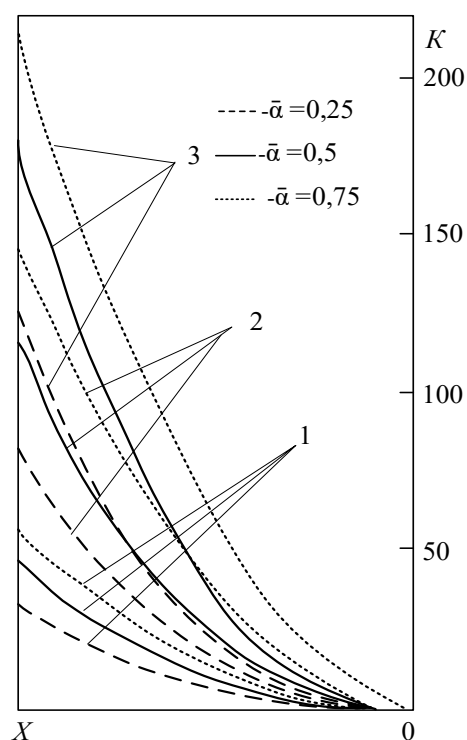


Рис. 3. Влияние скорости нагрева на эволюцию градиентов температуры. Нумерация кривых соответствует номеру в табл. 1, для скорости нагрева  $b$ .

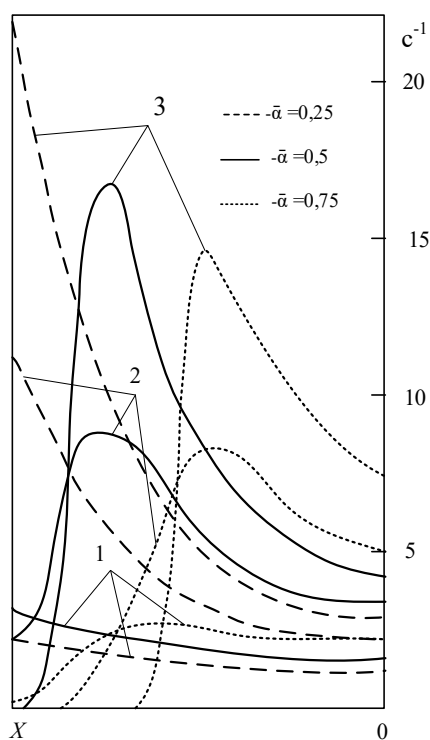


Рис. 2. Влияние скорости нагрева на эволюцию поля скоростей превращения. Нумерация кривых соответствует номеру в табл. 1, для скорости нагрева  $b$ .

Расчеты, проведенные при различных скоростях нагрева (варианты 1–3, табл. 1), показывают, что с повышением скорости нагрева и, соответственно, увеличением градиентов температур, неоднородность концентраций реагента также возрастает (рис. 1). Образование неоднородного поля концентраций и наличие градиентов температур в образце способствуют формированию экстремального распределения скорости реакции (рис. 2), максимум которой перемещается вглубь образца по мере протекания реакции. Характерно, что максимум, через который проходят локальные скорости реакции, тем ниже, чем дальше соответствующая точка отстоит от поверхности.

Абсолютные значения максимумов скорости реакции возрастают с увеличением скорости нагрева, что способствует повышению градиентов температур в образцах [20]. Отношение максимального значения тепловосприятости реагирующего образца  $Q_{\Sigma}^{\max}$  к тепловосприятости, соответствующему квазистационарному нагреву  $Q_{\text{к.с.}}$ , то есть величина  $S^{\max} = Q_{\Sigma}^{\max} / Q_{\text{к.с.}}$ , снижается с увеличением скорости нагрева при прочих равных условиях (рис. 4), где:

$$Q_{\Sigma}^{\max} = \rho C_p \int_0^X \frac{\partial T}{\partial \tau} dx + (Q^0 C^0 \cdot \bar{V}^{\max}) \cdot X,$$

$$Q_{\text{к.с.}} = \rho C_p \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} X.$$

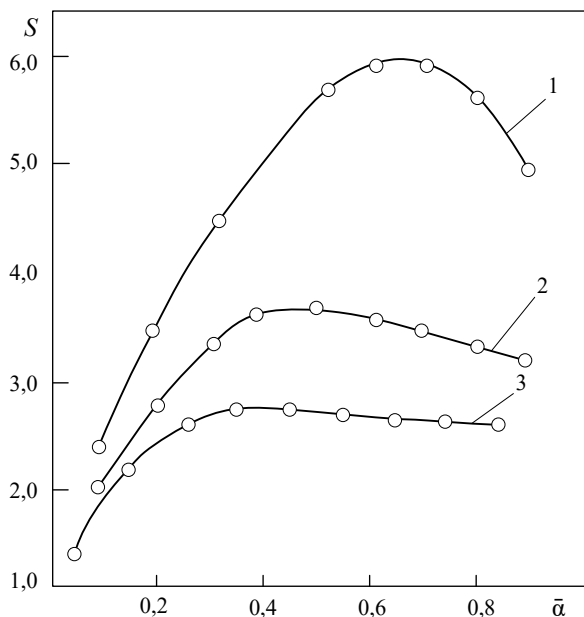


Рис. 4. Зависимость относительного тепловосприятия реагирующего образца от условий нагрева и средней степени превращения. Нумерация кривых соответствует табл. 1

Влияние вида функции  $f(\alpha)$  на макрокинетику термического разложения исследовалось на примере распространенной зависимости:  $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$ .

Варианты расчетов 4–6, представленные в табл. 1, проведены при различных значениях  $n$ . Как показывают результаты расчетов, увеличение показателя  $n$  в кинетическом уравнении способствует уменьшению неоднородности концентраций реагента в образце (рис. 5).

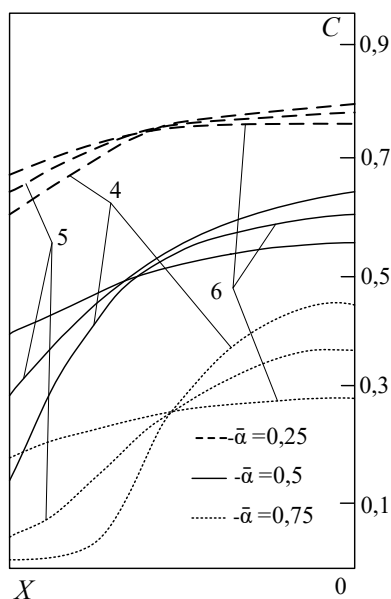


Рис. 5. Влияние вида функции  $f(\alpha)$  на эволюцию поля концентраций. Нумерация кривых соответствует табл. 1

Уменьшаются также абсолютные значения и неоднородность локальных скоростей реакции (рис. 6). Это, в свою очередь, способствует снижению перепадов температур в образцах [21].

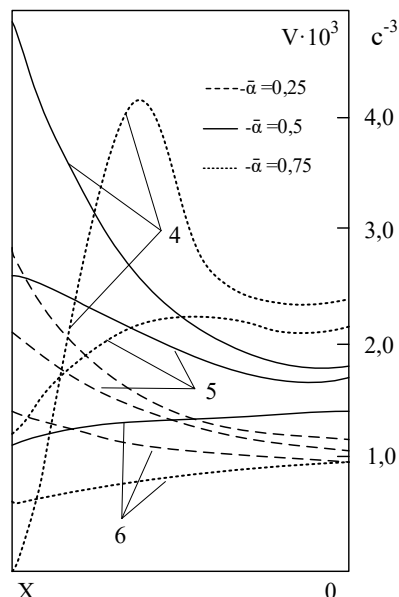


Рис. 6. Влияние вида функции  $f(\alpha)$  на эволюцию скоростей превращения. Нумерация кривых соответствует табл. 1

Результаты исследования влияния энергии активации термического разложения показывают, что с ее увеличением неоднородность концентраций реагента, поля скоростей и температур в исследуемых фосфорсодержащих рудных образцах возрастают [22].

### Заключение

Анализ результатов вычислительных экспериментов выявил зависимость между скоростью нагрева фосфоритового сырья и кинетики термического разложения карбонатов. Обнаружено, что в ряде случаев данная зависимость связана с влиянием условий внутреннего теплообмена в реагирующем железорудном образце на макрокинетику реакции диссоциации карбонатов.

В этой связи при определении влияния неизотермичности исследуемых образцов на точность термоаналитических исследований целесообразно использовать методы неизотермической кинетики: метод одного эксперимента с предварительным заданием вида функции  $f(\alpha)$  и метод серии экспериментов с различными скоростями нагрева образцов.

Проведены вычислительные эксперименты с использованием предложенной авторами математической модели для широкого диапазона изменений параметров кинетических уравнений и объемную теплоту реакций диссоциации карбонатов. Выявлены закономерности, которые позволят сформировать энергоресурсоэффективные режимы термической подготовки фосфорсодержащего рудного сырья посредством интенсификации тепломассообменных процессов при высокотемпературном обжиге.

В Научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ) разрабатываются оптимальные схемы обжиговых конвейерных машин для производства окатышей производительностью до 7,0 млн т/год. Учитывая, что фосфоритовое рудное сырье содержит до 30 % карбонатных составляющих, тепловой эффект реакции диссоциации карбонатов достигает 2,6 ГДж в год на одной обжиговой машине.

С учетом ежегодного роста цен на энергоносители, повышение энергоресурсоэффективности химико-энерготехнологических процессов термической подготовки фосфорсодержащего рудного сырья позволит повысить экономическую рентабельность его термической подготовки для производства фосфора в энергоемких руднотермических печах.

#### Список источников

- 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. 27(3), pp. 239–247.
- Kavchenkov V.P., Kavchenkova E.V., Chernenkov I.D. Modeling of the relationship between the earth population growth and the electric energy production processes. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4 (94), pp. 110–121. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-110-121.
- 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, 376, pp. 126–135.
- Ильин И.В., Лёвина А.И., Калязина С.Е. Функционально-ориентированный подход к автоматизации горнодобывающих предприятий // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 5–19. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-5-19
- Nayak D., Ray N., Dash N., 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.
- 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.
- Курилин С.П., Соколов А.М., Прохимнов 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
- 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. pp. 857–866.
- Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A. Technological parameters of the process of producing metalized iron concentrates from poor raw material. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, no. 8(11), pp. 600–603.
- 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
- Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B. Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 2018, no. 48(9), pp. 573–577.
- Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 1 (91), pp. 22–31. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-22-31
- Коссоy А.А., Лопатин А.В. Реакционная калориметрия: основные типы, простая теория и применение для исследования кинетики реакций // Химическая промышленность. 2020. Т. 97. № 4. С. 188–198.
- 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, no. 23(9), pp. 924–932.
- Pancneho S.V., Bobkov V.I., Fedulov A.S., Chernovalova M.V. Mathematical modelling of thermal and physical-chemical processes during sintering. *Non-Ferrous Metals*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 50–55.
- Meshalkin V.P., Khodchenko S.M., Bobkov V.I., Dli M.I. Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets. *Doklady Chemistry*, 2017, vol. 477, no. 2, pp. 282–285.
- Бобков В.И. Особенности электропроводности и структуры фосфоритов при высокотемпературном нагреве // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 77–83.
- Орехов В.А., Бобков В.И. Экспериментальная методика исследования кинетики термической декарбонизации при наличии градиентов температур в исследуемых образцах // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 6. С. 261–267. DOI: 10.34759/tpt2022-14-6-261-267
- Shvydkii V.S., Yaroshenko Y.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Modeling of metalized pellets firing with the account of physico-chemical transformations in them. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2018, 61(4), pp. 288–293.
- 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*. Springer, 2020, pp. 91–102.
- Yaroshenko Y.G. Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47(8), pp. 505–516.

22. **Бобков В.И.** Особенности тепловых процессов при агломерации фосфатного сырья // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 1. С. 40–46.

## References

1. **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. 27(3), pp. 239–247.
2. **Kavchenkov V.P., Kavchenkova E.V., Chernenkov I.D.** Modeling of the relationship between the earth population growth and the electric energy production processes. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4 (94), pp. 110–121. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-110-121.
3. **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, 376, pp. 126–135.
4. **Il'in I. V., Lyovina A.I., Kalyazina S.E.** Function-oriented approach to mining enterprise automation. *Journal of applied informatics*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 5–19. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-5-19
5. **Nayak D., Ray N., Dash N., 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.
6. **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.
7. **Kurilin S.P., Sokolov A.M., Prokimnov N.N.** Komp'yuternaya programma dlya modelirovaniya pokazatelej tekhnicheskogo sostoyaniya elektromekhanicheskikh system [Computer program for modeling indicators of the technical condition of electromechanical systems]. *Prikladnaya informatika*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 105–119. (In Russ.). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-105-119
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, pp. 857–866.
9. **Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A.** Technological parameters of the process of producing metalized iron concentrates from poor raw material. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, no. 8(11), pp. 600–603.
10. **Puchkov A.YU., Lobaneva E.I., Kultygin O.P.** Algorithm prognozirovaniya parametrov sistemy pererabotki othodov apatit-nefelinovykh rud [Algorithm for predicting the parameters of the apatite-nepheline ore waste processing system]. *Prikladnaya informatika*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 55–68. (In Russ.) DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-55-68
11. **Akberdin A.A., Kim A.S., Sultangaziev R.B.** Experiment Planning in the Simulation of Industrial Processes. *Steel in Translation*, 2018, no. 48(9), pp. 573–577.
12. **Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V.** Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. *Journal of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 1 (91), pp. 22–31. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-22-31
13. **Kossoj A.A., Lopatin A.V.** Reakcionnaya kalorimetriya: osnovnye tipy, prostaya teoriya i primeneniye dlya issledovaniya kinetiki reakcij. *Himicheskaya promyshlennost'*, 2020, vol. 97, no. 4, pp. 188–198.
14. **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, no. 23(9), pp. 924–932.
15. **Pancneko S.V., Bobkov V.I., Fedulov A.S., Chernova-lova M.V.** Mathematical modelling of thermal and physical-chemical processes during sintering. *Non-Ferrous Metals*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 50–55.
16. **Meshalkin V.P., Khodchenko S.M., Bobkov V.I., Dli M.I.** Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets. *Doklady Chemistry*, 2017, vol. 477, no. 2, pp. 282–285.
17. **Bobkov V.I.** Phosphorites electric conductivity and structures specifics at high temperature heating. *Thermal processes in engineering*, 2018, vol. 10, no. 1–2, pp. 77–83. (In Russ.)
18. **Orekhov V.A., Bobkov V.I.** Eksperimental'naya metodika issledovaniya kinetiki termicheskoy dekarbonizatsii pri nalichii gradientov temperatur v issleduemykh obrazcah [Experimental method for studying the kinetics of thermal decarbonization in the presence of temperature gradients in the samples under study]. *Teplovye processy v tekhnike*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 261–267. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt2022-14-6-261-267
19. **Shvydkii V.S., Yaroshenko, Y.G., Spirin, N.A., Lavrov V.V.** Modeling of metalized pellets firing with the account of physico-chemical transformations in them. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, 2018, no. 61(4), pp. 288–293.
20. **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. Springer: The Minerals, Metals & Materials Series*. 2020. pp. 91–102.
21. **Yaroshenko Y.G.** Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, pp. 505–516.
22. **Bobkov V.I.** Osobennosti teplovykh processov pri aglomeratsii fosfatnogo syr'ya [Features of thermal processes during agglomeration of phosphate raw materials]. *Thermal processes in engineering*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 40–46. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 19.09.2022; одобрена после рецензирования 24.03.2023; принята к публикации 05.04.2023.

The article was submitted on 19.09.2022; approved after reviewing on 24.03.2023; accepted for publication on 05.04.2023.