

## Моделирование химико-энерготехнологического процесса обжига рудного фосфатного сырья в динамическом плотном слое обжиговой конвейерной машины

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

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

**Аннотация.** Представлены физическая и математическая модели сложного энергоемкого химико-энерготехнологического процесса обжига рудного фосфатного сырья в движущемся плотном слое с перекрестной подачей газа-теплоносителя на конвейере обжиговой машины. Исследования проводились в температурных диапазонах тепловых и аэродинамических режимов функционирования действующих обжигowych конвейерных и агломерационных машин с учетом макрокинетики термически активируемых химико-энерготехнологических процессов декарбонизации. Научно обоснована причина воздействия условий внутреннего теплообмена в зернах рудного материала в реагирующем плотном слое на макрокинетику реакции диссоциации карбонатов. Предложенная модель отличается комплексным учетом широкого диапазона изменения параметров кинетических уравнений химико-энерготехнологического процесса диссоциации карбонатов. Представлен анализ адекватности предложенной модели. Проведена серия вычислительных экспериментов, направленных на выявление зависимости между условиями нагрева рудных образцов и степенью декарбонизации. Установлено влияние температурных зависимостей теплофизических характеристик сырого и обожженного рудного материала и теплофизических характеристик газа-теплоносителя. Обнаружено влияние условий обжига рудного фосфатного сырья на расход и температуру греющего газа от времени. Определены распределения температур газа-теплоносителя и рудного материала по высоте слоя в любой момент времени, распределение температур в элементарной измерительной ячейке, тепловосприятие ячейки и слоя рудного материала в целом, степени превращения в отдельных зернах и плотном слое.

**Ключевые слова:** фосфатная руда, высокотемпературный обжиг, декарбонизация, температура, теплообмен, обжигочная машина, газ-теплоноситель

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

**Для цитирования.** Орехов В.А., Бобков В.И., Дли М.И. Моделирование химико-энерготехнологического процесса обжига рудного фосфатного сырья в динамическом плотном слое обжигочной конвейерной машины // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 11. С. 524–531. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177598>

Original article

## Modeling the ore-phosphate raw material roasting chemical-power-technological process in dynamic dense layer of the roast conveyor machine

V.A. Orekhov<sup>1</sup>✉, V.I. Bobkov<sup>1</sup>, M.I. Dli<sup>1</sup><sup>1</sup>Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, Russia

✉fundukoff@mail.ru

**Abstract.** The article presents physical and mathematical models of a complex energy-intensive chemical-power-technological process of the phosphate raw materials roasting in a moving dense layer with cross-feeding of heat-carrying gas on the of the roast machine conveyor. The studies were conducted in the temperature ranges of thermal and aerodynamic modes of functioning of roasting conveyor and sintering machines operating with account for macro-kinetics of thermally activated chemical-energy-technological processes of decarbonizing. The cause of internal heat exchange conditions in the ore material grains in the reacting dense layer impact on the carbonates dissociation reaction macro-kinetics was scientifically substantiated. The proposed model is being distinguished by the complex accounting for the wide range of kinetic equations parameters of the carbonates dissociation chemical-power-technological process. The article presents the adequacy analysis of the proposed model. The authors performed a series of computational experiments oriented to revealing the dependence between the ore samples heating conditions and the degree of decarbonizing. The temperature dependences effect of raw and roasted ore materials and thermo-physical characteristics of the heat-carrying gas, as well as roast conditions of the ore phosphate raw material consumption and temperature of the heating gas dependency on time were revealed. The heat-carrying gas and raw material temperature distributions along the layer height at any time instant, temperature distribution in the elementary measuring cell, the heat pickup of the cell and raw the material layer in total, transformation degrees in separate grains and in the dense layer were determined.

**Keywords:** phosphate ore, high-temperature firing, decarbonization, temperature, heat exchange, roast machine, heat-carrying gas

**Funding.** The study was performed within the framework of the State assignment, Project No. FSWF-2023-0012.

**For citation.** Orekhov V.A., Bobkov V.I., Dli M.I. Modeling the ore-phosphate raw material roasting chemical-power-technological process in dynamic dense layer of the roast conveyor machine. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 11, pp. 524–531. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177598>

### Введение

Эффективность сложного энергоемкого химико-энерготехнологического процесса обжига рудного сырья в движущемся плотном слое с перекрестной подачей газа-теплоносителя на конвейере обжиговой машины определяется условиями протекания гетерогенных процессов в его элементах [1, 2]. Элементом слоя является зерно рудного сырья, имеющее в общем случае произвольную форму [3, 4]. В моделях, предназначен-

ных для решения практических и методических задач, зерна могут быть представлены простыми формами [5, 6]. Введение в технологические расчеты соответствующих поправок, учитывающих параметры реального плотного слоя рудного сырья, таких как эффективная поверхность, порозность и другие, позволяет использовать такие модели для решения технических задач с достаточной для практики точностью [7, 8].

Целью исследования является разработка физической, математической и компьютерной модели

для описания и расчета сложного энергоемкого термически активируемого химико-энерготехнологического процесса обжига рудного сырья в динамическом плотном слое с перекрестной подачей газа-теплоносителя в обжиговой конвейерной машине. Модель отличается комплексным учетом характера гетерогенных реакций диссоциации карбонатов в элементах плотного слоя рудного сырья, теплового и аэродинамического режима функционирования обжиговых конвейерных машин. В работе также научно обосновано влияние условий внутреннего теплообмена в зернах рудного фосфатного сырья в динамическом реагирующем плотном слое на макрокинетику гетерогенной термически активируемой реакции диссоциации карбонатов.

**Физическая, математическая и компьютерная модели теплообмена в плотном слое рудного сырья**

Для последующих вычислительных экспериментов химико-металлургического процесса обжига предложена следующая физическая модель. Реальный плотный слой рудного сырья толщиной  $H$  заменен системой плоских горизонтальных ячеек в количестве  $k$ , имеющих толщину  $\Delta Y$ . В состав ячейки входят пластины толщиной  $2X$  в количестве  $m$ , представляющие собой модель зерен реагирующего слоя. Количество пластин в ячейке определяется порозностью  $\varepsilon$ , моделируемого слоя:

$$m = \frac{\Delta Y}{2X}(1 - \varepsilon), \text{ а толщина пластин } 2X \text{ задается}$$

в соответствии с размером зерен реального слоя рудного сырья на конвейере обжиговой машины [9, 10].

Предполагается, что размеры элементарных ячеек и пластин могут задаваться различными по высоте слоя. При этом обязательным является условие:

$$H = \sum_{i=1}^k \Delta Y_i.$$

Теплообмен между пластинами ячейки и перекрестно подаваемым газом-теплоносителем осуществляется с граничными условиями третьего рода [11, 12].

Предполагается также, что в пределах элементарной ячейки температура газа-теплоносителя остается постоянной и изменяется только по высоте плотного слоя, то есть при переходе от предыдущей ячейки к последующей [13, 14]. Перенос тепла в результате теплопроводности слоя считается пренебрежимо малым [15].

Принятая физическая модель слоя с учетом допущений позволяет использовать для решения внутренних задач теплообмена и кинетики химико-энерготехнологических процессов сушки и декарбонизирующего обжига элементарного рудного зерна математическую модель вида:

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

При этом начальные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} T(x, 0) = T_0; \quad \alpha_1(x, 0) = 0; \\ \alpha_2(x, 0) = 0; \quad \alpha_w(x, 0) = 0; \end{aligned} \quad (2)$$

граничные условия принимают вид:

$$\lambda(T) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=X} = K_F (T_r - T)_{x=X}; \quad \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  — степень превращения, а именно отношение  $\alpha = 1 - G(\tau)/G_0$ , где  $G_0$  — количество карбонатного вещества, вступающего в реакцию,  $G(\tau)$  — количество не прореагировавшего вещества за время  $\tau$ ,  $\alpha_1$  — степень превращения  $MgCO_3$ ,  $\alpha_2$  — степень превращения  $CaCO_3$ .  $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2 - Q_1^0$  и  $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 - Q_2^0$ , где  $Q_1 = 1,21 \times 10^5$  Дж/кг — тепловой эффект реакции разложения  $MgCO_3$ ,  $Q_2 = 1,78 \times 10^5$  Дж/кг — тепловой эффект реакции разложения  $CaCO_3$ .  $C_1^0, C_2^0$  — начальные концентрации карбонатов магния и кальция соответственно,  $E_1, E_2$  — энергии активации диссоциации карбонатов, Дж/моль,  $k_{01}, k_{02}$  — предэкспоненциальные множители. Аналогично для процесса сушки, описываемого уравнением Аррениуса:  $\alpha_w$  — степень сушки,  $W^0$  — начальное влагосодержание, кг/м<sup>3</sup>,  $Q_w^0$  — удельная теплота парообразования,  $k_{0w}$  и  $E_w$  — предэкспоненциальный множитель и энергия активации процесса сушки. Вид функций  $f_1(\alpha_1), f_2(\alpha_2),$

$f_w(\alpha_w)$  также считается известным.  $x$  — координата по толщине пластины с полутолщиной  $X$ ,  $x \in [-X; X]$ ,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура,  $\lambda$  — удельная теплопроводность,  $\rho$  — плотность. В настоящей работе предполагается известной зависимость объемной теплоемкости от температуры и степеней превращения, она имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho C_p(T, \alpha_w, \alpha_1, \alpha_2) = & \rho C_p(T)^o + \\ + [\rho C_p(T)^c - \rho C_p(T)^o] & (1 - \alpha_\Sigma) + \\ + \rho C_p(T)(1 - \alpha_w), & \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha_\Sigma = 0,5(\alpha_1 + \alpha_2)$  — суммарная степень превращения,  $\rho C_p(T)^c$ ,  $\rho C_p(T)^o$  — температурные зависимости объемной теплоемкости необожженного  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  и нацело обожженного  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$  рудного материала, соответственно. Выбор линейного вида функции (4) основывается на свойстве аддитивности теплоемкости смеси [16].

Условия нагрева плотного слоя рудного фосфатного сырья в обжиговой машине могут быть воспроизведены заданием переменных во времени температур газа-теплоносителя на входе в слой  $(T_\Gamma)_{y=0} = T_\Gamma(\tau)$  и скорости газа-теплоносителя на полное сечение аппарата  $\omega_\Gamma = \omega_\Gamma(\tau)$ .

Для расчёта распределения температуры газа-теплоносителя по высоте слоя использовалась зависимость:

$$\omega_\Gamma(\tau) \rho_\Gamma(T) C_{p\Gamma}(T) \frac{dT_\Gamma}{dy} = Q, \quad (5)$$

где  $Q$  — тепло, воспринимаемое слоем материала, включает в себя тепловые потоки, расходуемые на нагрев материала и покрытие эндотермических эффектов гетерогенных превращений. Значение определяется из решения внутренней задачи теплообмена пластины, толщиной  $2X$ :

$$\begin{aligned} Q = \int_0^{2X} \left( \rho C_p(T) \frac{dT}{dx} + Q_1^0 C_1^0 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} + \right. \\ \left. + Q_2^0 C_2^0 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} + Q_w^0 W^0 \frac{\partial \alpha_w}{\partial \tau} \right) dx. \end{aligned}$$

В конечных разностях уравнение (5) имеет вид:

$$\omega_\Gamma(\tau) \rho_\Gamma(T) C_{p\Gamma}(T) \frac{(T_{\Gamma i} - T_{\Gamma i-1})}{\Delta Y_i} = Q_i, \quad (6)$$

где  $Q_i$  определяется с учетом принятой физической модели:

$$\begin{aligned} Q_i = \frac{\Delta Y_i}{2X} (1 - \varepsilon) \int_0^{2X} \left( \rho C_p(T) \frac{dT}{dx} + \right. \\ \left. + Q_1^0 C_1^0 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} + Q_2^0 C_2^0 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} + Q_w^0 W^0 \frac{\partial \alpha_w}{\partial \tau} \right) dx. \end{aligned}$$

Выражение (6) используется для определения температур газа-теплоносителя в слое:

$$T_{\Gamma i} = T_{\Gamma i-1} + \frac{Q_i \Delta Y_i}{\omega_\Gamma(\tau) \rho_\Gamma(T) C_{p\Gamma}(T)}.$$

Для конвективной теплоотдачи считалось справедливой критериальная зависимость общего вида  $Nu = a Re^b$ , таким образом, температурная зависимость коэффициента теплоотдачи определялась температурной зависимостью теплопроводности  $\lambda_\Gamma(T)$  и кинематической вязкостью  $\eta_\Gamma(T)$  газа-теплоносителя.

В вычислительных экспериментах использовались следующие зависимости:

$$\begin{cases} Nu = 0,108 Re, & \text{при } Re < 200, \\ Nu = 0,61 Re^{0,67}, & \text{при } Re \geq 200. \end{cases}$$

Для проведения вычислительных экспериментов по полученной математической модели была разработана компьютерная модель, исходными данными для которой являются:

- параметры физической модели:  $\Delta Y_i = f_1(y)$ ,  $2X_i = f_2(y)$ , высота слоя  $H$ , порозность слоя, поправочный множитель, учитывающий эффективную поверхность реального плотного слоя рудного сырья [17];
- температурные зависимости теплофизических характеристик сырого и обожженного рудного материала, теплофизические характеристики газа-теплоносителя;
- параметры кинетических уравнений — энергии активации, предэкспоненты, показатели степеней реакций диссоциации карбонатов и процесса сушки, концентрации реагирующих компонентов и влаги [18];
- условия обжига рудных материалов — зависимости расхода и температуры греющих газов от времени [19, 20].

По результатам вычислительных экспериментов были получены распределения температур газа и рудного материала по высоте слоя в любой момент времени, распределение температур в элементарной ячейке (элементарном зерне), тепло-

восприятие ячейки и слоя фосфатного рудного материала в целом, степени превращения в отдельных зернах и слое и т. д.

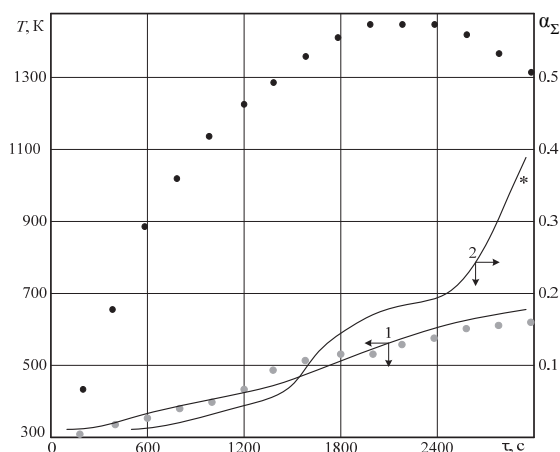
### Сопоставление результатов численных расчетов с натурными экспериментами

Для проверки работоспособности и точности принятой модели теплообмена в движущемся плотном слое рудного материала на конвейере обжиговой машины с перекрестной подачей газа-теплоносителя проведены численные эксперименты с исходными данными, соответствующие натурным исследованиям [21]. Сравнения проводились с экспериментальными результатами обследования действующих обжиговых машин [22], результатами моделирования проектного и форсированного режима обжига на аглочае (экспериментальная установка).

Для численных расчетов использовались теплофизические характеристики из числа имеющих в работах авторов [23] для рудного сырья с близким химическим составом к используемым в экспериментах.

Результаты вычислительных экспериментов на разработанной компьютерной модели представлены ниже.

На рис. 1 точками изображена зависимость температуры газа-теплоносителя на входе в слой от времени, принятая для численного решения.



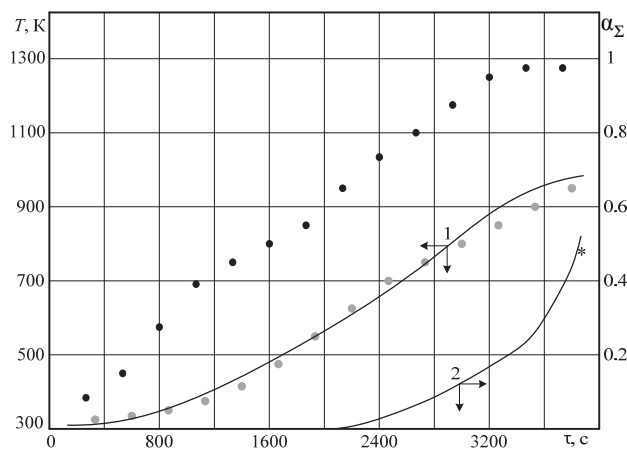
**Рис. 1.** Сопоставление результатов численных расчетов с натурными экспериментами на обжиговой конвейерной машине: ● — температура газа-теплоносителя на входе и на выходе из слоя соответственно (эксперимент), \* — степень декарбонизации по результатам химического анализа, 1 — температура газа-теплоносителя на выходе из слоя (по результатам расчета), 2 — средняя по слою степень декарбонизации (по результатам расчета)

Кривая 1 соответствует температурам газа-теплоносителя на выходе из слоя, полученным в вычислительных экспериментах на компьютерной модели. Кривая 2 — зависимость средней по слою степени декарбонизации рудного сырья приведена. Звездочкой отмечена степень декарбонизации по результатам химического анализа обожженного сырья.

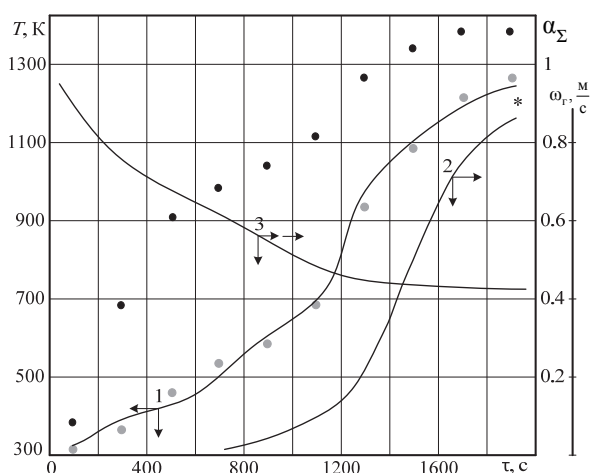
Рассчитанная по модели кривая 1 хорошо совпадает с экспериментальными данными по температуре отходящего газа-теплоносителя, что показывает адекватность предлагаемой модели в части расчета изменения температуры газа-теплоносителя в слое.

Рассчитанная степень декарбонизации по модели (кривая 2) в конце зоны высокотемпературного обжига (после обжига) совпадает с экспериментом по химическому анализу обожженного рудного фосфатного сырья, что показывает правильность описания макрокинетики гетерогенной термически активируемой реакции диссоциации карбонатов и ее кинетических параметров.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты экспериментов на аглочае (экспериментальная установка) по моделированию проектного и форсированного режимов обжига, а также результаты соответствующих им численных расчетов по представленной математической и разработанной компьютерной моделям.



**Рис. 2.** Сопоставление результатов экспериментального моделирования проектного режима обжига с численным расчетом по компьютерной модели: ● — температура газа-теплоносителя на входе и на выходе из слоя соответственно (эксперимент), \* — степень декарбонизации по результатам химического анализа, 1 — температура газа-теплоносителя на выходе из слоя (по результатам расчета), 2 — средняя по слою степень декарбонизации (по результатам расчета)



**Рис. 3.** Сопоставление результатов экспериментального моделирования форсированного режима обжига с численным расчетом по компьютерной модели: ● — экспериментальные температуры газа-теплоносителя на входе и на выходе из слоя соответственно, \* — степень декарбонизации по результатам химического анализа, 1 — температура газа-теплоносителя на выходе из слоя (по результатам расчета), 2 — средняя по слою степень декарбонизации (по результатам расчета), 3 — скорость газа-теплоносителя

На рисунке 3 дополнительно приведена зависимость скорости подачи газа-теплоносителя в слой от времени (кривая 3), так как эта величина изменялась во время опыта.

Совпадение рассчитанных по модели и полученных в экспериментах данных свидетельствует об адекватном учете основных характеристик и параметров гетерогенных реакций диссоциации карбонатов в рудном фосфатном сырье во время обжига, а также при форсированном нагреве в экспериментальной установке. Обнаружено определяющее влияние внутреннего теплообмена в зернах рудного сырья на макрокинетику гетерогенной термически активируемой реакции диссоциации карбонатов.

Таким образом, предлагаемая модель адекватна и может быть использована для разработки оптимальных энергоресурсоэффективных режимов функционирования работающих обжиговых конвейерных и агломерационных машин, а также при автоматизированном проектировании новых.

### Заключение

Сопоставление численных решений с натурными экспериментами, реализуемыми в существенно различных условиях, свидетельствует о качественном и количественном соответствии результатов. Расхождение в температурах отходящих газов во всех рассмотренных случаях не превышало 50 К.

Приведенная погрешность расчета средней по слою степени декарбонизации находится в пределах  $\pm 8\%$ .

На основании сопоставления результатов вычислительных и натурных экспериментов можно сделать вывод о том, что в принятой математической модели обосновано учтены факторы, определяющие ход химико-энерготехнологического процесса обжига фосфатного рудного сырья в плотном слое, просасываемом газом-теплоносителем, и эта модель может служить инструментом изучения основных закономерностей указанного сложного и энергоемкого химико-энерготехнологического процесса.

Полученные результаты могут быть использованы для выработки оптимальных с точки зрения энергоресурсоэффективности режимов функционирования агломерационных и обжиговых конвейерных машин, которые предполагают оптимизацию процессов термической подготовки рудного сырья за счет интенсификации тепломассообменных процессов при высокотемпературном обжиге в плотном слое на конвейере обжиговой машины, на базе разработанной компьютерной модели. Формирование указанных оптимальных режимов позволит снизить топливные и энергетические затраты на термическую подготовку рудного сырья, а также уменьшить общие экономические издержки в производстве фосфора за счет использования термического разложения карбонатов в обжиговых конвейерных и агломерационных машинах, а не в энергоемких руднотермических печах, потребляющих дорогую электрическую энергию.

### Список источников

1. Bobkov V.I., Dli M.I., Sokolov A.M., Rubin Y.B. Analysis of chemical-metallurgical agglomeration processes during charge sintering // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 2. P. 7–11.
2. 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 2 // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2017. Vol. 60. No. 1. P. 19–23.
3. 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. Iss. 3. P. 239–247.
4. Лавров И.В., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Бардушкин А.В. Прогнозирование эффективной теплопроводности пенополимерных материалов // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 7. С. 290–300.
5. Хамидуллин О.Л., Низамиев Р.Р., Балькаев Д.А., Амирова Л.М. Определение теплопроводности полимеров методом дифференциальной сканирующей

- калориметрии с температурной модуляцией // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 4. С. 186–192.
6. **Kossoy A.** Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 143. P. 599–608.
  7. **Липатов Н.В.** Лабораторное исследование проницаемости карбонатных пород под воздействием высоких температур // *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т. 13. № 4. С. 185–192.
  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 // *The Minerals, Metals and Materials Series*. Springer, 2020. P. 857–866.
  9. **Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjaev 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. Iss. 11. P. 600–603.
  10. **Puchkov A., Lobaneva E., Kultygin O.** Algorithm for predicting the parameters of a system for processing waste apatite-nepheline ores // *Journal of Applied Informatics*. 2022. Vol. 17. No. 1. P. 55–68.
  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. P. 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. P. 22–31.
  13. **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.
  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. Vol. 23. Iss. 9. P. 924–932.
  15. **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. No. 2. P. 50–55.
  16. **Novichikhin A.V., Shorokhova A.V.** Control procedures for the step-by-step processing of iron ore mining waste // *Institution news. Ferrous metallurgy*. 2017. Vol. 60. No. 7. P. 565–572.
  17. **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.
  18. **Shvydkii V.S., Yaroshenko Y.G., Spirin N.A., Lavrov V.V.** Modeling of metallized pellets firing with the account of physico-chemical transformations in them // *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018. Vol. 4. Iss. 61. P. 288–293.
  19. **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* / Ed. by Jian Li, Bowen Li, Shadia Ikhmayies et al. Springer, 2020. P. 91–102.
  20. **Yaroshenko Y.G.** Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. Iss. 8. P. 505–516.
  21. **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. P. 565–572.
  22. **Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Fedulov A.S.** Mathematical simulation of chemical and energotechnological processes and procedures of coke fines burning in agglomerated layer // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. No. 1. P. 13–17.
  23. **Dli M.I., Bobkov V.I., Kulyasov N.S., Sokolov A.M.** Features of research of iron ore thermal decarbonization kinetics during roasting // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 22. P. 4–8.

#### References

1. **Bobkov V.I., Dli M.I., Sokolov A.M., Rubin Y.B.** Analysis of chemical-metallurgical agglomeration processes during charge sintering. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 2, pp. 7–11.
2. **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 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23.
3. **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, iss. 3, pp. 239–247.
4. **Lavrov I.V., Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Bardushkin A.V.** Prognozirovanie jeffektivnoj teploprovodnosti penopolimernyh materialov [Prediction of effective thermal conductivity of polymer foam materials]. *Thermal Processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 7, pp. 290–300. (In Russ.)
5. **Hamidullin O.L., Nizamiev R.R., Bal'kaev D.A., Amirova L.M.** Opredelenie teploprovodnosti polimerov metodom differencial'noj skanirujushhej kalorimetrii s temperaturnoj moduljaciej [Determination of the thermal conductivity of polymers using differential scanning calorimetry with temperature modulation]. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 186–192 (In Russ.)
6. **Kossoy A.** Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 143, pp. 599–608.

7. **Lipatov N.V.** Laboratornoe issledovanie pronicaemosti karbonatnyh porod pod vozdejstviem vysokih temperatur [Laboratory study of the permeability of carbonate rocks under the influence of high temperatures]. *Thermal Processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 185–192. (In Russ.)
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. *The Minerals, Metals and Materials Series*. Springer, 2020, pp. 857–866.
9. **Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjaev 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, iss. 11, pp. 600–603.
10. **Puchkov A., Lobaneva E., Kultygin O.** Algorithm for predicting the parameters of a system for processing waste apatite-nepheline ores. *Journal of Applied Informatics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 55–68.
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. **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, pp. 22–31.
13. **Kossov A.A., Lopatin A.V.** Reakcionnaja kalorimetrija: osnovnye tipy, prostaja teorija i primenenie dlja issledovaniya kinetiki reakcij [Reaction calorimetry: basic types, simple theory and applications to study reaction kinetics]. *Himicheskaja promyshlennost'*, 2020, vol. 97, no. 4, pp. 188–198 (In Russ.)
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, vol. 23, iss. 9, pp. 924–932.
15. **Pancnehko 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, no. 2, pp. 50–55.
16. **Novichikhin A.V., Shorokhova A.V.** Control procedures for the step-by-step processing of iron ore mining waste. *Institution news. Ferrous metallurgy*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 565–572.
17. **Orekhov V.A., Bobkov V.I.** Jeksperimental'naja metodika issledovaniya kinetiki termicheskoj dekarbonizacii pri nalichii gradientov temperatur v issleduemyh obrazcah [Experimental technique for studying the kinetics of thermal decarbonization in the presence of temperature gradients in the samples under study]. *Thermal Processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 261–267. (In Russ.)
18. **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, vol. 4, iss. 61, pp. 288–293.
19. **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*. Ed. by Jian Li, Bowen Li, Shadia Ikhmayies et al. Springer, 2020, pp. 91–102.
20. **Yaroshenko Y.G.** Thermal physics as the basis for energy and resource conservation in steelmaking. *Steel in Translation*, 2017, vol. 47, iss. 8, pp. 505–516.
21. **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.
22. **Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Fedulov A.S.** Mathematical simulation of chemical and energotechnological processes and procedures of coke fines burning in agglomerated layer. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, no. 1, pp. 13–17.
23. **Dli M.I., Bobkov V.I., Kulyasov N.S., Sokolov A.M.** Features of research of iron ore thermal decarbonization kinetics during roasting. *CIS Iron and Steel Review*, 2021, vol. 22, pp. 4–8.

Статья поступила в редакцию 21.09.2023; одобрена после рецензирования 16.10.2023; принята к публикации 16.11.2023.

The article was submitted on 21.09.2023; approved after reviewing on 16.10.2023; accepted for publication on 16.11.2023.