

УДК 665.6

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕДЕЛЬНЫХ И ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОКАЛКИ КУСКОВОГО И ОКОМКОВАННОГО РУДНОГО ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ НА КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКЕ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ

© 2023 г. В. П. Мешалкин^а, В. А. Орехов^б, М. И. Дли^б, В. И. Бобков^б *, Т. Б. Чистякова^с

^аРоссийский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

^бНациональный исследовательский университет “МЭИ”, г. Смоленск, Россия

^сСанкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: vovabobkoff@mail.ru

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.

После доработки 26.03.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

В данной работе предложена методика и математическая модель для расчета химико-энерготехнологического процесса обжига рудного фосфатного сырья в движущемся плотном слое на колосниковой решетке обжиговой конвейерной машины. По результатам проведенных вычислительных экспериментов на разработанной компьютерной модели, представлен анализ предельных и оптимальных режимов процессов сушки и обжига кускового и окомкованного рудного фосфатного сырья на конвейере обжиговой машины. Определены предельные условия прокалики кускового и окомкованного рудного сырья при засыпке в виде монослоя кусков, совместном обжиге и в виде слоя фосфоритовых окатышей, с учетом технологических ограничений функционирующих обжиговых конвейерных машин. Для фосфатного рудного сырья установлено, что предельно достижимая степень декарбонизации при высокотемпературном обжиге в виде кусков в обжигово-конвейерной машине составляет 60%. Обжиг в виде окатышей, позволяет обеспечить степень декарбонизации в 80%. Предложенная в настоящей работе методика теплофизических и кинетических исследований может быть распространена на изучение закономерностей термически активируемых эндотермических химико-металлургических процессов прокалики в широком классе железорудных сырьевых материалов. Представленная компьютерная модель для расчета предельных и оптимальных условий функционирования обжиговых конвейерных машин используется для оперативной адаптации промышленных установок, к периодически изменяющимся свойствам рудных сырьевых материалов, поступающих на термическую обработку.

Ключевые слова: температура, рудное сырье, фосфорит, окатыши, прокалика, обжиг, сушка, химико-энерготехнологический процесс, обжиговая конвейерная машина

DOI: 10.31857/S0040357123040073, **EDN:** ZAQDZE

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе предлагается методика численного поиска предельных параметров химико-энерготехнологических процессов сушки и высокотемпературного обжига фосфатного рудного сырья в плотном слое на колосниковой решетке с целью определения оптимальных режимов реализации указанных энергоемких процессов в обжигово-конвейерных технологических аппаратах [1, 2]. Под предельными, понимаются такие режимные условия протекания химико-энерготех-

нологического процесса прокалики, которые обеспечивают его максимальную эффективность и производительность обжигово-конвейерных технологических аппаратов, работающих на заданном рудном сырье, при высоте и фракционном составе засыпки, учитывающие выполнение технологических ограничений [3, 4]. Так как скорости процессов сушки, высокотемпературного обжига и спекания при термической подготовке возрастают с повышением температуры, предельные условия будут достигаться, если нагрев плотного слоя рудного сырья до требуемой или пре-

дельно допустимой температуры происходит наикратчайшим путем и при этой температуре материал выдерживается в течении времени, необходимого для завершения термически активируемых химико-энерготехнологических процессов обжига [5, 6]. При этом температура газов на

входе в слой T_g^* не должна превышать предельно допустимых для данного аппарата значений T_g^{*max} . Ограничения накладываются и на темпера-

туру газов, покидающих слой T_g^{**} согласно условиям безаварийной работы колосниковой решетки. Максимальные скорости прососа газов в предельных режимах должны обеспечиваться производительностью тяго-дутьевых установок – эксгаустеров обжиговой конвейерной машины [7, 8].

Определенные ограничения на предельный режим функционирования обжигово-конвейерной машины накладывают специфические особенности обрабатываемого фосфатного рудного сырья [9, 10]. В частности, температура, поступающего в зону сушки, греющего газа, не должна

превышать некоторого заданного значения – T_d^* , во избежание разрушения зерен кускового или окомкованного рудного сырья парами воды, образующимися при дегидрации кристаллогидратов и испарения физической влаги [11, 12]. То

есть, повышение T_g^{*max} выше T_d^* , может осуществляться при достижении заданной степени сушки α_w^z . Перепад температур в зернах дисперсного рудного материала, вызванный нестационарными условиями нагрева и протеканием эндотермических химико-энерготехнологических процессов, не должен превышать, допустимых условиями термической прочности значений [13, 14].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ОБЖИГА

Таким образом, определение предельных условий реализации процессов прокалики сводится к поиску таких зависимостей $T_g^*(\tau)$ и $\omega_g(\tau)$, которые удовлетворяли бы следующим условиям:

$$\frac{dT_g^*}{d\tau} \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$T_g^{**} \rightarrow T_r^{\max}, \quad (2)$$

$$\omega_g \rightarrow \omega_g^{\max}, \quad (3)$$

при выполнении ограничений:

$$T_g^* \leq T_r^{*max}, \quad (4)$$

$$T_g^{**} \leq T_r^{\max}, \quad (5)$$

$$\Delta T_m \leq \Delta T_m^{\max}, \quad (6)$$

$$\omega_g \leq \omega_g^{\max}, \quad (7)$$

где: $\omega_g^{\max}$ – максимальная скорость прососа газов, $T_r^{\max}$ – предельная температура газов на колосниковой решетке, ΔT_m , $\Delta T_m^{\max}$ – текущий и предельный перепады температур в зерне рудного материала.

Учитывая, что плотный слой по каналу воздействия – скорость газов – температура газов на выходе из слоя характеризуется распределенностью параметров и значительной инерционностью, условие (2) с ограничением (5) сформируется следующим образом в уравнение:

$$\Theta \frac{dT_g^{**}}{d\tau} + (T_g^{**} - T_r^{\max}) = 0, \quad (8)$$

где: Θ – постоянная времени процесса прокалики – может быть определена если задаться длительностью процесса τ_p и относительной величиной недогрева:

$$\Delta = \frac{T_r^{\max} - T_g^{**}}{T_r^{\max} - T_m^0} \Big|_{\tau=\tau_p}, \quad (9)$$

где: T_m^0 – начальная температура рудного материала.

Тогда из условия (8), можно определить

$$\Theta = -\frac{\tau_p}{\ln \Delta}.$$

При постановке численного поиска, с целью упрощения задачи скорость повышения температуры газа на входе в слой, условие (1), задавалась постоянной. Ее значение определялось на основании допущения о том, что скорость повышения температуры зерен рудного материала не превышает температуры газа теплоносителя [15, 16]. Тогда с учетом ограничений, функция $T_g^*(\tau)$ примет вид:

$$T_g^*(\tau) \leq T_d^*, \quad \text{при } 0 < \alpha_w \leq \alpha_w^z, \quad (10)$$

$$\frac{dT_g^*}{d\tau} = \frac{\Delta T_m^{\max} \cdot 6a^{\min}}{X^2} = \text{const}, \quad (11)$$

$$\text{при } T_d^* < T_g^* < T_g^{*max},$$

где: $a^{\min}$ — минимальное значение коэффициента температуропроводности в интервале температур обжига.

С учетом принятых допущений, определение предельных режимов сводится к определению момента времени, в который выполняется условие (10) и определение вида функции $\omega_g(\tau)$, при котором процесс обжига протекает с минимальным отклонением от функции (8).

Поиск предельных режимов осуществлялся путем численных решений системы дифференциальных уравнений в частных производных вида:

$$\begin{cases} \rho C_p(T_m, \alpha_w, \alpha_1, \alpha_2) \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) - \\ - \left(C_1^0 Q_1^0 \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} + C_2^0 Q_2^0 \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} + W^0 Q_w^0 \frac{\partial \alpha_w}{\partial \tau} \right); \\ \frac{\partial \alpha_1}{\partial \tau} = k_{01} \exp \left(-\frac{E_1}{RT_m} \right) f_1(\alpha_1); \\ \frac{\partial \alpha_2}{\partial \tau} = k_{02} \exp \left(-\frac{E_2}{RT_m} \right) f_2(\alpha_2); \\ \frac{\partial \alpha_w}{\partial \tau} = k_{0w} \exp \left(-\frac{E_w}{RT_m} \right) f_w(\alpha_w). \end{cases} \quad (12)$$

При этом начальные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} T_m(x, 0) &= T_m^0; \quad \alpha_1(x, 0) = 0; \\ \alpha_2(x, 0) &= 0; \quad \alpha_w(x, 0) = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

граничные условия принимают вид:

$$\begin{aligned} \lambda(T_m) \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right)_{x=X} &= K_F (T_g - T_m)_{x=X}, \\ \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right)_{x=0} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь: α — 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 τ , α_1 — степень превращения MgCO_3 , α_2 — степень превращения CaCO_3 . $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 - Q_1^0$ и $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - Q_2^0$, где $Q_1^0 = 1.21 \times 10^5$ Дж/моль — тепловой эффект реакции разложения MgCO_3 , $Q_2^0 = 1.78 \times 10^5$ Дж/моль — тепловой эффект реакции разложения CaCO_3 . C_1^0 , C_2^0 — начальные концентрации карбонатов магния и кальция соответственно, кг/м³, E_1 , E_2 — энергии активации диссоциации карбонатов, Дж/моль, k_{01} , k_{02} — предэкспоненциальные множители. Аналогично, для процесса сушки, представленным уравнением Арениуса: α_w — степень

сушки, W^0 — начальное влагосодержание, кг/м³, 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, λ — удельная теплопроводность, ρ — плотность. В настоящей работе предполагается известной зависимость объемной теплоемкости от температуры и степени превращения, она имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho C_p(T_m, \alpha_w, \alpha_1, \alpha_2) &= \rho C_p(T_m)^0 + \\ &+ [\rho C_p(T_m)^c - \rho C_p(T_m)^0] (1 - \alpha_\Sigma) + \\ &+ \rho C_p(T_m) (1 - \alpha_w), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\alpha_\Sigma = 0.5(\alpha_1 + \alpha_2)$ — суммарная степень превращения (декарбонизации), $\rho C_p(T_m)^c$, $\rho C_p(T_m)^0$ — 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 (15) основывается на свойстве аддитивности теплоемкости смеси [17, 18].

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

Для расчета распределения температуры газа-теплоносителя по высоте слоя использовалась зависимость

$$\omega_g(\tau) \rho_g(T) C_{pg}(T) \frac{dT_g}{dy} = Q, \quad (16)$$

где: Q — тепло, воспринимаемое слоем рудного 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 $2X$

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

В конечных разностях уравнение (16) имеет вид:

Таблица 1. Химический анализ образца – фосфатно-глинисто-кремнистого сланца, содержание компонентов, %

P ₂ O ₅	CaO	MgO	CO ₂	SiO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Прочие	ρ, кг/м ³
21.7	44.2	8.0	19.1	2.9	0.3	0.2	0.5	0.7	2.4	2850 до обжига 2300 после обжига

$$\omega_g(\tau)\rho_g(T)C_{pg}(T)\frac{(T_{gi}-T_{gi-1})}{\Delta Y_i} = Q_i, \quad (17)$$

где Q_i определяется с учетом принятой физической модели

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

Выражение (17) используется для определения температур газа-теплоносителя в плотном слое:

$$T_{gi} = T_{gi-1} + \frac{Q_i \Delta Y_i}{\omega_g(\tau)\rho_g(T)C_{pg}(T)}.$$

МЕТОДИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для вычислительного поиска бала создана компьютерная модель на языке Borland C++. Вид зависимости $\omega_g(\tau)$ определялся путем минимизации отклонения от функции, определяемой уравнением (8). Для этого изменения скорости газа теплоносителя в каждый момент времени определялись из условия:

$$\Theta \frac{dT_g^{**}}{d\tau} + \left(T_g^{**} - T_r^{\max} \right) = K \frac{d\omega_g}{d\tau},$$

где: K – коэффициент, определяемый опытным путем.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием разработанной компьютерной модели, на основе представленной методики численного поиска, проводились вычислительные эксперименты. Анализ результатов многочисленных вычислительных экспериментов показал влияние на эффективность энергоемкого процесса обжига монослоя кускового рудного сырья: температуры греющего газа и высоты слоя засыпки рудного сырья на колосниковую решетку обжиговой конвейерной машины [19, 20]. Определены оптимальные условия реализации химико-энерготехнологического процесса обжига монослоя, а также сушки и прокалики окомкованного рудного фосфатного сырья на постели кускового фосфорита, в плотном слое на конвейере обжиг-

вой машины [21, 22]. Обоснованы также, оптимальные условия сушки и обжига окомкованного рудного фосфатного сырья на постели из обожженных фосфоритовых окатышей, применительно к обжиговой машине ОК-108. Все варианты расчетов проведены для слоя со средним размером зерен 0.025 м. В вычислительных экспериментах использовались теплофизические, кинетические закономерности процессов сушки и обжига, полученные ранее авторами [23, 24] для кускового и окомкованного фосфорита, из рудной породы – фосфатно-глинисто-кремнистого сланца, химический состав которого представлен в табл. 1.

Анализ результатов экспериментов. Результаты вычислительных экспериментов представлены графически.

На рис. 1 приведены результаты четырех вычислительных экспериментов по определению предельных режимов обжига монослоя кускового фосфорита в зависимости от высоты слоя засыпки и температуры греющего газа [25, 26]. Кривые 1 и 2 соответствуют расчетным температурам газа-теплоносителя на входе и выходе из слоя, соответственно. Кривая 3 соответствует расчетным значениям скорости прососа нагревающих газов. Средние значения по слою степени декарбонизации сырья, соответствующие вычислительным экспериментам, отмечены кривыми 4.

На рис. 2 приведены распределения температур рудного материала и степеней превращения по высоте слоя, соответствующие окончанию процесса обжига $\tau = 2650$ с. Обжиг считался законченным при достижении температурой уходя-

щих газов значения: $T_g^{**}(\tau) = T_r^{\max} - \Delta$, где $\Delta = 20$ К, $T_r^{\max} = 923$ К.

Вычислительные эксперименты показывают, что предельно достижимые степени декарбонизации для принятых условий и при предельных параметрах, соответствующих функционирующим обжиговым машинам составляют около 60%. Установлено, что увеличение высоты засыпки незначительно повышает качество обожженного рудного материала. Повышение температуры греющего газа в пределах 1273–1473 К позволяет интенсифицировать химико-энерготехнологический процесс обжига. Предельные степени декарбонизации возрастают при этом на 15%. Из

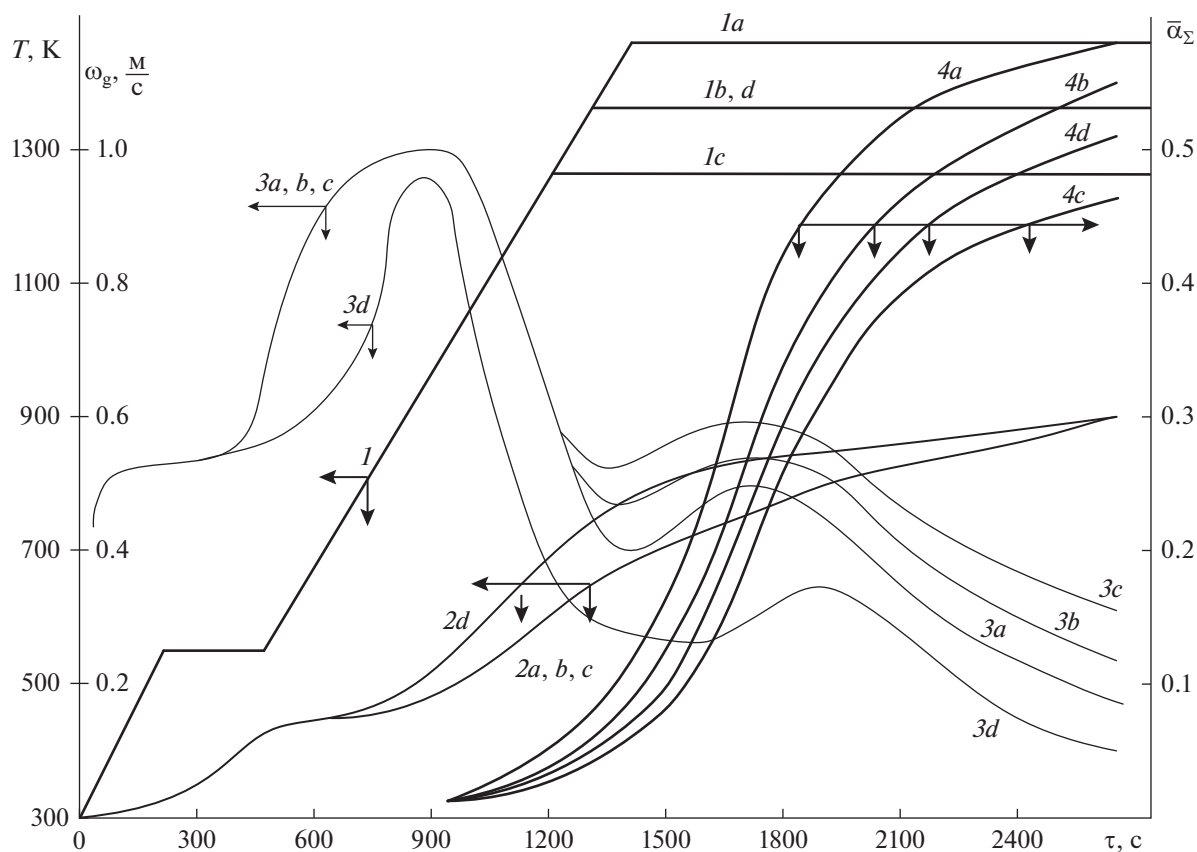


Рис. 1. Предельные режимы обжига кускового фосфорита – фосфатно-глинисто-кремнистого сланца. 1, 2 – температуры греющих газов на входе и выходе из слоя, соответственно; 3 – скорость подачи газа теплоносителя; 4 – средняя по слою степень декарбонизации; варианты *a, b, c* – соответствуют температурам газа на входе в слой: 1473 К, 1373 К, 1273 К, соответственно, при высоте засыпки 0.5 м; вариант *d* – соответствует температуре газа теплоносителя 1373 К, при высоте засыпки 0.35 м.

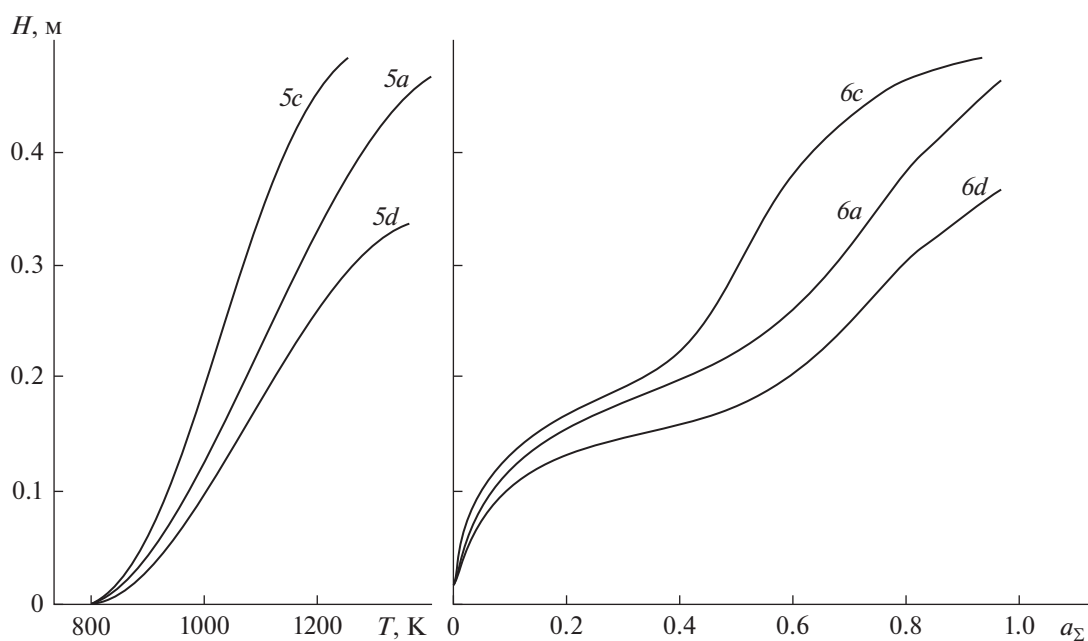


Рис. 2. Распределение температуры и степени декарбонизации по высоте слоя в конце процесса обжига $\tau = 2650$ с. 5 – температура материала, 6 – степень декарбонизации, буквенные индексы соответствуют рис. 1.

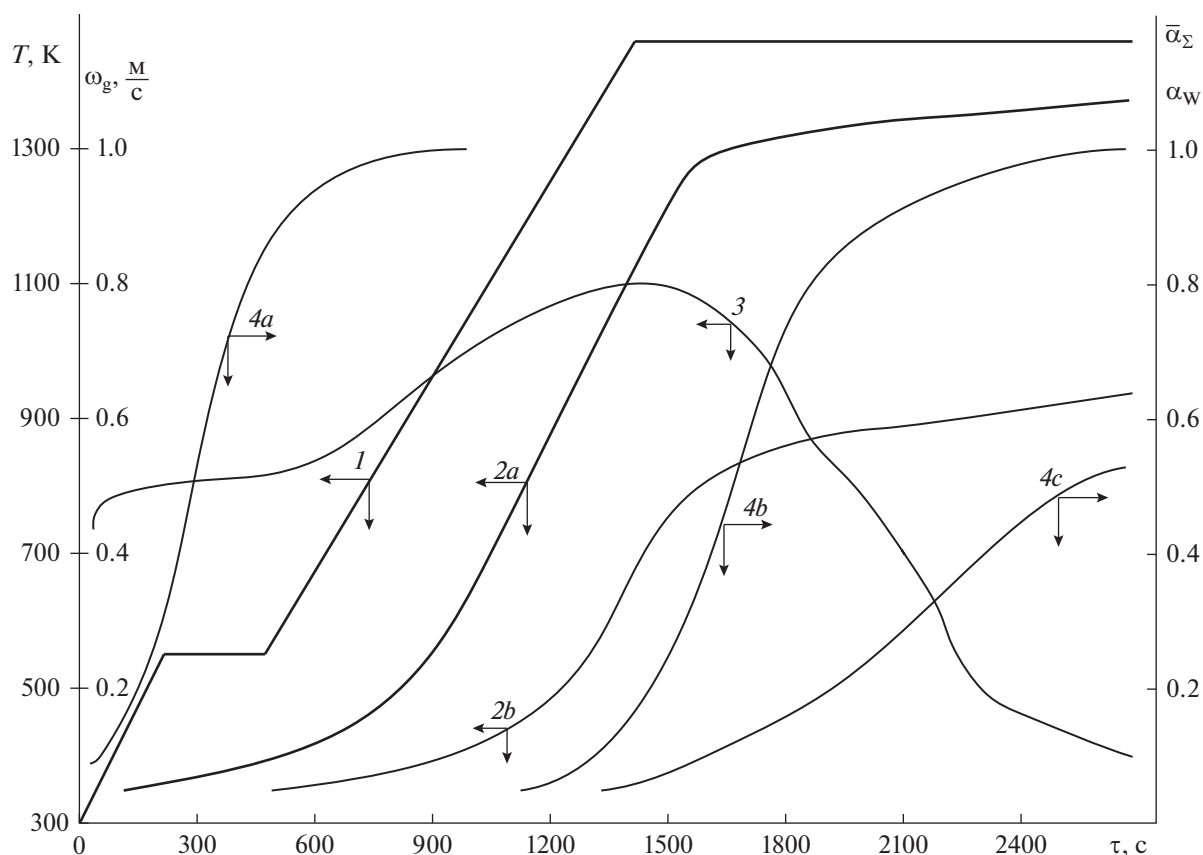


Рис. 3. Оптимальный режим обжига фосфоритовых окатышей на “постели” кускового фосфорита. 1, 2a, 2b — температуры греющих газов на входе, границы окатышей и на выходе из слоя, соответственно; 3 — скорость подачи газа теплоносителя; 4a, 4b и 4c — кривые сушки, средней по слою степени декарбонизации фосфоритовых окатышей и “постели”, соответственно.

числа приведенных режимов, наиболее эффективным следует считать режим 1a, соответствующий обжигу слоя рудного материала, высотой 0.5 м, нагреваемым газом теплоносителем с предельной температурой 1474 К. Он позволяет получать наиболее качественно обожженный рудный материал при максимальной производительности аппарата. Зависимости температуры и скорости прососа газов от времени, соответствующие этому режиму, могут рассматриваться как оптимальные для принятого в вычислительных экспериментах рудного фосфатного сырья.

На рис. 3 приведены результаты расчетов оптимальных условий сушки и обжига окомкованного сырья — фосфоритовых окатышей (высота засыпки 0.4 м) и постели кускового фосфорита (высота засыпки 0.1 м) при технологических ограничениях, соответствующих действующим обжиговым конвейерным машинам.

Распределения температур материала по высоте слоя и степени декарбонизации, по окончании процесса обжига $\tau = 2650$ с, показаны на рис. 4.

Реализация расчетного режима на обжиговой машине позволит получать практически нацело обожженные и упрочненные окатыши. При этом средняя степень декарбонизации кускового фосфатного сырья составит 50%.

Результаты расчетов оптимальных условий сушки и обжига окомкованного рудного фосфатного сырья (высота засыпки 0.24 м) на постели обожженных окатышей (высота засыпки 0.06 м) приведены на рис. 5, 6. В расчетах предельная температура газов, покидающих слой, принималась равной 1073 К, что соответствует технологическим ограничениям действующих обжиговых конвейерных машин [24]. Расчеты показывают, что реализация оптимального режима позволяет получать фосфоритовые окатыши со средней степенью декарбонизации около 80%. При этом только 65% окатышей прокаливается до температуры выше 1150 К, соответствующей началу спекания. Таким образом, 35% готовых фосфоритовых окатышей будет иметь неудовлетворительное качество.

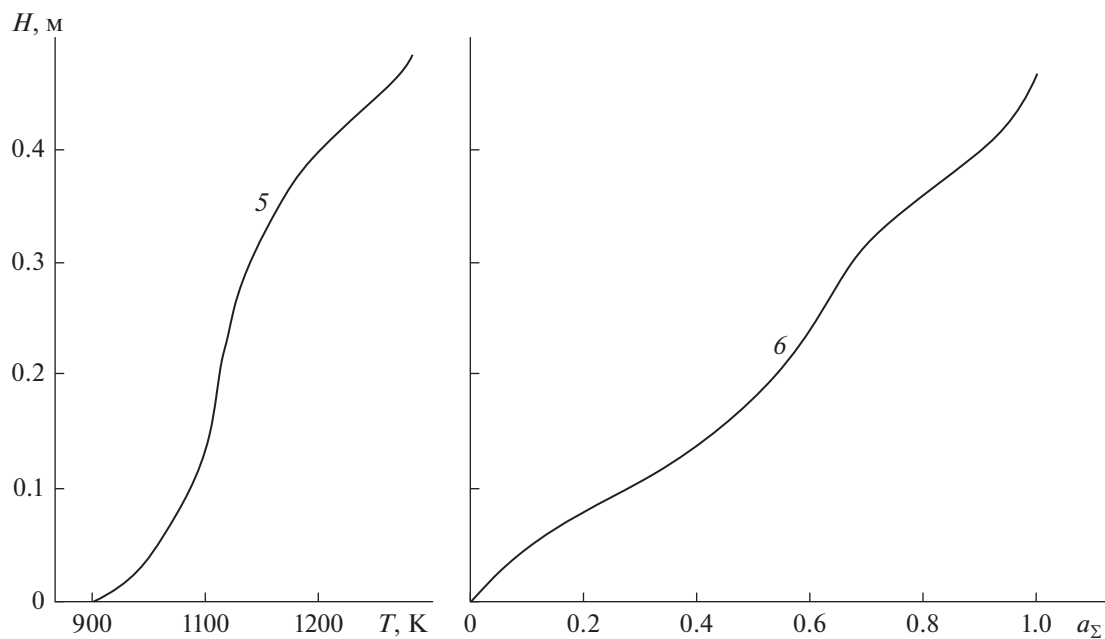


Рис. 4. Распределение температуры материала и степени декарбонизации по высоте слоя в конце процесса обжига $\tau = 2650$ с. Совместный обжиг. 5 – температура материала, 6 – степень декарбонизации.

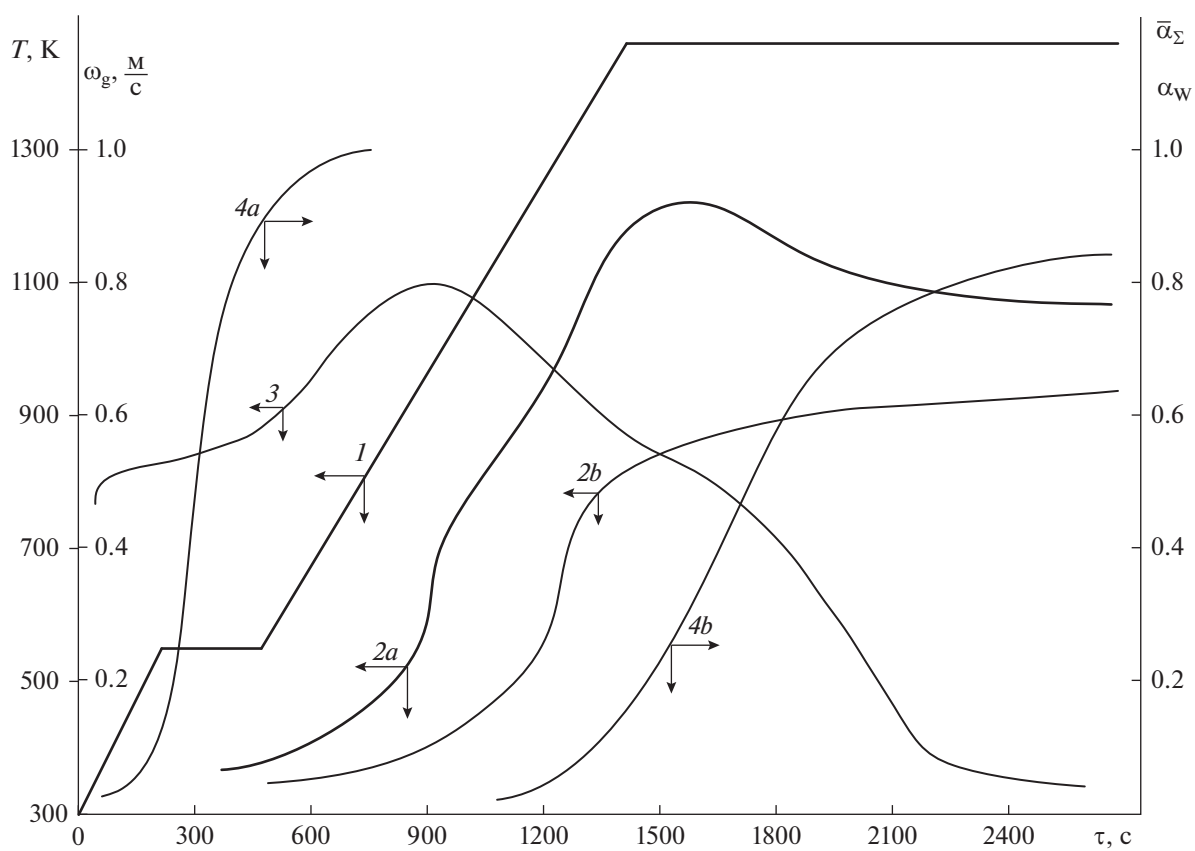


Рис. 5. Оптимальный режим обжига фосфоритовых окатышей на “постели” из отожженных окатышей в машине типа ОК. 1, 2а, 2б – температуры греющих газов на входе, на границе сырых окатышей и на выходе из слоя, соответственно; 3 – скорость подачи газа теплоносителя; 4а, 4б – кривые степени сушки, средней по слою степени декарбонизации окатышей соответственно.

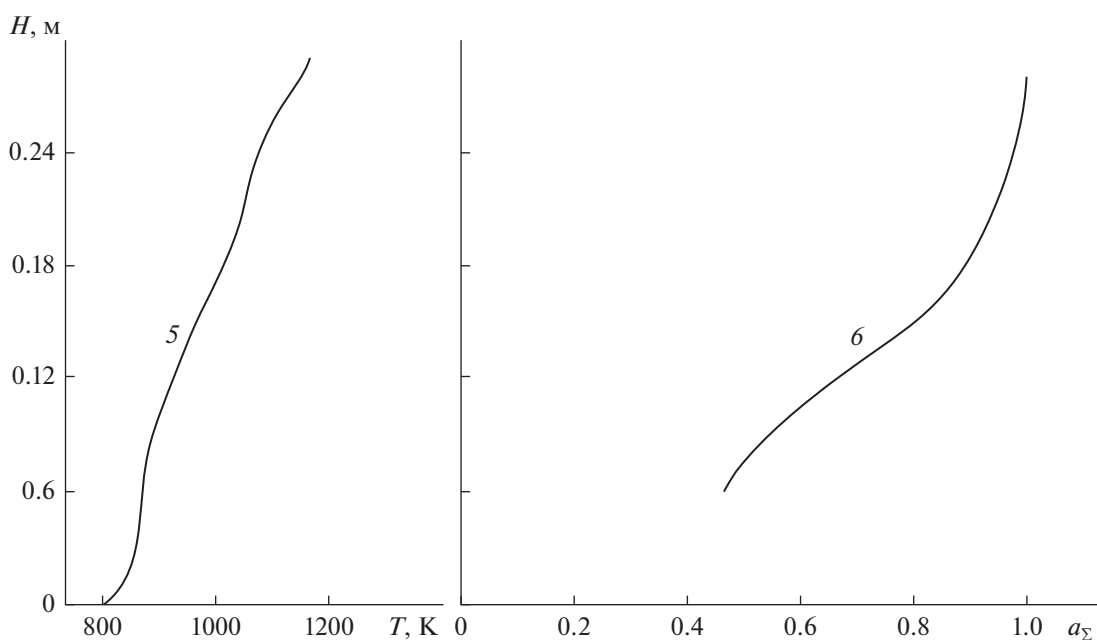


Рис. 6. Распределение температуры материала и степени декарбонизации по высоте слоя в конце процесса обжига фосфоритовых окатышей. 5 — температура материала, 6 — степень декарбонизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика и компьютерная модель вычислительного поиска предельных и оптимальных режимов сложного химико-энерготехнологического процесса прокали. Определены оптимальные режимы обжига кускового рудного фосфатного сырья и окатышей на постели кускового материала применительно к современным обжиговым машинам конвейерного типа.

Научно обосновано, что наиболее высокая степень декарбонизации фосфатного рудного сырья достигается прокалкой в обжиговой машине конвейерного типа в полученном оптимальном режиме. Следует отметить, что измельчение и последующее окомкование фосфоритового рудного сырья, а также присадки связующих материалов, способствуют снижению температур размягчения рудного сырья, что может в дальнейшей переработке отрицательно повлиять на работу верхней зоны фосфорной рудотермической печи.

Методика численного поиска и разработанная компьютерная модель могут использоваться для оперативной режимной адаптации промышленных установок обжига к теплофизическим, реакционным и прочностным свойствам рудного фосфатного сырья.

Исследование проведено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-79-30029.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

α	степень реагирования реакции декарбонизации
ω	скорость газа-теплоносителя, м/с
λ	коэффициент теплопроводности, Вт/м К
ρ	плотность, кг/м ³
τ	время, с
ε	порозность плотного слоя
T	температура, К
x	координата
C_p	удельная теплоемкость, Дж/(кг К)
C_i^0	начальная концентрация карбонатов
Q	количество теплоты, Дж
Q_i^0	тепловой эффект декарбонизации, Дж/моль
X	полутолщина пластины, м
H	высота плотного слоя, м
G	количество прореагировавшего вещества, моль
k_0	предэкспоненциальный множитель, с ⁻¹
α_w	степень сушки
W^0	начальное влагосодержание, кг/м ³
Q_w^0	удельная теплота парообразования, Дж/моль

ИНДЕКСЫ

<i>i</i>	номер компонента в смеси карбонатов
<i>g</i>	газ
<i>m</i>	рудный материал
<i>W</i>	процесс сушки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.П. Динамическое моделирование непрерывных технологических процессов в среде LABVIEW // Российский химический журн. (Журн. Рос. хим. об-ва). 2022. Т. 66. № 2. С. 8–15.
2. Meshalkin V.P., Dovi V.G., Bobkov V.I., et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering // Mendelev Communications, 2021. 31(5). P. 593–604.
3. Самтылова С.А., Торгашов А.Ю. Применение физически обоснованной математической модели массообменного технологического процесса для повышения точности оценивания качества конечного продукта // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 3. С. 379–396.
4. Zhu X., Ji Y. A digital twin-driven method for online quality control in process industry // International J. Advanced Manufacturing Technology. 2022. 119(5–6). P. 3045–3064.
5. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Михайлова П.Г. Современное состояние в области анализа, синтеза и оптимального функционирования многоассортиментных цифровых химических производств: аналитический обзор // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 2. С. 154–187.
6. 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.
7. Акулич П.В., Слижук Д.С. Тепломассоперенос в плотном слое при дегидратации коллоидных и сорбционных капиллярно-пористых материалов в условиях нестационарного радиационно-конвективного энергоподвода // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 2. С. 148–157.
8. Zhu X., Ji Y. A digital twin-driven method for online quality control in process industry // International J. Advanced Manufacturing Technology. 2022. 119(5–6). P. 3045–3064.
9. Борисов В.В., Курилин С.П., Луферов В.С. Нечеткие реляционные когнитивные темпоральные модели для анализа и прогнозирования состояния сложных технических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1(97). С. 27–38.
10. Трушин А.М., Носырев М.А., Равичев Л.В., Фролова С.И., Яшин В.Е., Ильина С.И. Сочетание вариационного и эмпирического методов определения порозности при осаждении сферических частиц // Теоретические основы химической технологии. 2022. Т. 56. № 2. С. 205–208.
11. Meshalkin V., Bobkov V., Dli M., Dovi V. Optimization of energy and resource efficiency in a multistage drying process of phosphate pellets // Energies. 2019. Т. 12. № 17. С. 3376.
12. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1(97). С. 55–68.
13. Буткарев А.А., Вербыло С.Н., Бессмертный Е.А., Буткарева Е.А. Совершенствование и практическое использование методологии ВНИИМТ для оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин с рабочими площадями 278, 306 и 552 м² // Сталь. 2020. № 5. С. 7–13.
14. 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. P. 126–135.
15. Цирлин А.М., Гагарина Л.Г., Балунов А.И. Синтез теплообменных систем, интегрированных с технологическим процессом // Теоретические основы химической технологии. 2021. Т. 55. № 3. С. 347–358.
16. Matyukhin V.I., Yaroshenko Y.G., Bragin V.V. Sintered iron-ore manufacturing capabilities when using combined fuel // Steel in Translation. 2019. Т. 49. № 11. С. 771–777.
17. Ming Yan, Xinnan Song, Jin Tian, Xuebin Lv, Ze Zhang, Xiaoyan Yu and Shuting Zhang. Construction of a new type of coal moisture control device based on the characteristic of indirect drying process of coking coal // Energies 2020. 13(16), 4162.
18. Деревянко М.С., Кондратьев А.В. Исследование фазовых превращений и термодинамических свойств оксидных систем // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 3. С. 188–189.
19. Nayak D., Ray N., Dash N., et al. Induration aspects of low-grade ilmenite pellets: Optimization of oxidation parameters and characterization for direct reduction application // Powder Technology. 2021. 380. P. 408–420.
20. Савельев С.Г., Кондратенко М.Н. Системное исследование технологических параметров, определяющих интенсивность агломерационного процесса // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 184–191.
21. Belyakov N.V., Nikolina N.V. Plant protection technologies: From advanced to innovative // J. Physics: Conference Series. 2021. 1942(1), 012072.
22. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Orekhov V.A., Garabadzhiu A.V. Heat Conductivity of a Composite Phosphate Ore Material with Reacting Carbonate Inclusions // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2022. V. 56. № 6. P. 971–977.

23. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I., Fedulov A.S., Shinkevich A.I. Computer-assisted decision-making system of optimal control over the energy and resource efficiency of a chemical energotechnological system for processing apatite-nepheline ore wastes // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2021. V. 55. № 1. P. 62–69.
24. Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6. С. 102–121.
25. Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Долматов А.В., Витькина Г.Ю. Влияние структуры обожженных окатышей на прочность и разрушение при испытании на статическое сжатие // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 11. С. 785–792.
26. Пучков А.Ю., Соколов А.М., Федотов В.В. Нейросетевой метод анализа процессов термической обработки окомкованного фосфатного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 5. С. 62–76.