

УДК 004.942

DOI 10.17513/snt.39698

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ШЛАМА В РУДНО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПЕЧАХ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ФОСФАТНОГО РУДНОГО СЫРЬЯ

Орехов В.А.

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Смоленский филиал,
Смоленск, e-mail: fundukoff@mail.ru*

Представлена модель явления образования шлама во время протекания процессов электротермической переработки рудного фосфатного сырья в рудно-термических печах для определения режимов управления, обеспечивающих повышение энерго- и ресурсоэффективности, техногенной и экологической безопасности, с учетом способов переработки и утилизации. В модели предложена модификация решения задачи для многостадийного процесса шлагообразования на основе применения критерия энерго- и ресурсоэффективности, позволяющего учитывать количественные и качественные параметры. Представлены использующие гидродинамический подход математические модели, с помощью которых возможно описать процессы шлагообразования в многостадийных процессах переработки фосфатного рудного сырья в рудно-термических печах. Первая предложенная модель описывает теплогидравлические процессы нестационарных состояний фосфорной рудно-термической печи при переработке рудного фосфатного сырья в приближении сосредоточенных параметров. Стационарные режимы также описываются этой моделью и представляют собой ее частный случай при равенстве нулю производных от параметров. Следующая модель описывает процесс уноса мелкофракционных частиц, обуславливающий процесс образования шлама в рудно-термических печах и загрязняющих выходящий из них фосфорный полуфабрикат. Основой построения данной модели служит предположение о том, что перемещение капель расплава барботирующими газами является одной из основных причин появления пыли в расплаве.

Ключевые слова: тепловой баланс, шлам, рудно-термическая печь, математическое моделирование, фосфатное рудное сырье, шихта

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00335,
<https://rscf.ru/project/22-11-00335/>.*

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF SLUDGE FORMATION IN ORE THERMAL FURNACES DURING PROCESSING OF PHOSPHATE ORE RAW

Orekhov V.A.

*National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk branch,
Smolensk, e-mail: fundukoff@mail.ru*

A model of phenomenon of sludge formation during the course of the processes of thermal processing of ore phosphate raw materials in ore-thermal furnaces is presented to determine the control modes that provide an increase in energy and resource efficiency, technogenic and environmental safety, taking into account the methods of processing and disposal. The model proposes a modification of the solution of the problem for a multi-stage sludge formation process based on the application of the criterion of energy and resource efficiency, which allows taking into account quantitative and qualitative parameters. Mathematical models using the hydrodynamic approach are presented, with the help of which it is possible to describe the processes of sludge formation in multi-stage processes for the processing of phosphate ore raw materials in ore-thermal furnaces. The first proposed model describes the thermal-hydraulic processes of non-stationary states of a phosphorus ore-thermal furnace during the processing of ore phosphate raw materials in the approximation of lumped parameters. Stationary modes are also described by this model and represent its particular case when the derivatives of the parameters are equal to zero. The following model describes the process of entrainment of fine particles, which determines the formation of sludge in ore-thermal furnaces and pollutes the phosphorus semi-finished product coming out of them. This model is based on the assumption that the movement of melt droplets by bubbling gases is one of the main reasons for the appearance of dust in the melt.

Keywords: heat balance, sludge, ore-thermal furnace, mathematical modeling, phosphate ore raw materials, charge

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. № 22-11-00335,
<https://rscf.ru/en/project/22-11-00335/>.*

Прогнозирование пригодности сырья для нужд термической переработки, выбор рациональных схем и режимная адаптация энергоёмких аппаратов горно-обогатитель-

ной отрасли к периодически изменяющимся свойствам рудного сырья сталкиваются с трудностями, обусловленными устаревшими подходами к моделированию и ме-

тодам расчета процессов термической подготовки и переработки, достаточно полно учитывающим специфические особенности и свойства фосфатного сырья. Поиск оптимальных условий протекания процессов на действующем оборудовании представляет собой весьма сложную и дорогостоящую задачу из-за большого количества факторов, влияющих на конечный результат протекающих химико-технологических процессов. Поэтому в настоящее время оптимальным способом изучения и последующей рационализации протекающих при термической обработке фосфатного рудного сырья процессов является метод построения математических и компьютерных моделей, точно описывающих все особенности и составляющие химико-технологических превращений и позволяющих провести анализ и спрогнозировать изменения исходного рудного материала, повышая качество готовой продукции и выбирая наиболее энергоресурсоэффективные режимы работы оборудования. Математическое моделирование процессов образования и переноса пылевых шламовых частиц является одним из актуальных направлений для анализа и понимания путей совершенствования технологии электротермического производства фосфора. Вначале рассмотрим унос капель жидкости – расплава, который зависит от скорости газов, барботирующих расплав. Для этого следует проанализировать механизмы формирования газового потока в реакционной зоне электротермического реактора, в котором принято разделение на несколько областей: зона шихты, зона расплава, углеродистая зона, зона ферросплава, зона шлакообразования.

Восстановительная реакция фосфора $P_2O_5 + 5C \rightarrow 5CO + P_2$, при помощи которой возможно стехиометрически описать компоненты реакции, в свою очередь позволяет выбрать направление разработки и моделирования реактора [1, 2].

Влияние управляющих параметров на процессы, протекающие в рудно-термической печи (РТП), можно оценить, применив приближенное описание ее состояний с помощью применения сосредоточенных параметров.

В реакционной зоне возможно записать уравнение энергетического баланса в следующем виде:

$$d \left(\sum_{i=1}^3 M_i c_{pi} T_i \right) / d\tau = \sum_{i=1}^3 G_i c_{pi} T_m + P_a - G_g c_{pg} T_l - G_l c_{pl} T_l - q_r w_r \gamma_p. \quad (1)$$

Для этого были конкретизированы вектора:
– входной вектор

$$\mathbf{X} = \{ T_s, C_{s P_2O_5}, G_s, G_c, G_{sl}, r_s, r_c, r_{sl} \},$$

$$i = P_2O_5, CaO, MgO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3,$$

$$F, S, CO_2, C, H_2O, R_2O, Lem, Проч.$$

где R_2O – общее обозначение не конкретизированных в списке оксидов, *Lem* – летучие фракции, *Проч* – прочие соединения;
– выходной вектор

$$\mathbf{Y} = \{ G_p, C_{l P_2O_5}, J_{elj}, T_g, G_g, C_{pg}, G_l, T_l, C_{dg}, M_k \},$$

$$j = 1 \dots 3;$$

– управляющий вектор

$$\mathbf{U} = \{ G_c, G_{sl}, l_j, dy_j, U_j, C_{pg}, n_l \};$$

– вектор состояния

$$\mathbf{R} = \{ P_a, R_a, T_m, T_r, h_c, h_l, h_s, L_j, G_s \},$$

где T_s – температура сырья на входе в рудно-термическую печь, T_g – температура газов на выходе в пространстве свода рудно-термической печи, T_m – температура начала процесса расплавления шихты, T_l – температура расплавленной шихты, T_r – температура жидкой фазы реакционной зоны, C_{pg} – концентрация фосфора, $C_{s P_2O_5}$ – концентрация фосфоросодержащих окисей в исходном сырье, $C_{l P_2O_5}$ – концентрация фосфоросодержащих окисей в расплаве, C_{dg} – концентрация частиц пыли в отводных газах, h_c – высота коксовой зоны, G_g – расход печных газов, C_l – расход шлака, C_c – расход кокса, C_{sl} – расход кварцита, C_p – расход фосфора в зоне выхода, C_s – расход шихты, h_l – высота шлака, h_s – высота шихтовой зоны; l_j – перемещение j -го электрода, dy_j – перепуск j -го электрода, L_j – положение задействованных концов электродов (абсолютное); U_j – фазное напряжение, J_{elj} – плотность тока j -го электрода.

Характеристики гранулометрического состава шихты: r_s – средний радиус частиц фосфорита, M_k – модуль кислотности, r_c – средний радиус частиц кокса, r_{sl} – средний радиус частиц кварцита, n_l – количество открытых леток, P_a – активная полезная мощность; R_a – сопротивление реакционной зоны.

Масса вступающих в превращения компонентов оксида фосфора, кокса и расплава постоянна и описывается как

$$d(M_s C_{lP_2O_5})/d\tau = G_1 C_{SP_2O_5} - G_l C_{lP_2O_5} - w_r, \quad (2)$$

$$dM_l/d\tau = \sum_{i=1}^3 G_i - G_3 - G_l - (\gamma_g - \gamma_c) w_r, \quad (3)$$

$$dM_c/d\tau = G_3 - \gamma_c w_r, \quad (4)$$

Принимая следующие начальные условия:

$$\tau = 0, M_l = M_{l0}, T_l = T_{l0},$$

$$C_{lP_2O_5} = C_{SP_2O_5}, M_c = M_{c0},$$

где M_i – массы i -х компонентов: $i = 1, G_1, M_s$ – для фосфорита, $i = 2, G_2, M_l$ – для расплава, $i = 3, G_3, M_c$ – для кокса; c_{pi} – теплоемкости i -х компонентов, w_r – скорость восстановительной реакции оксида фосфора P_2O_5 , γ_i – коэффициент, учитывающий пересчет реагента для i -го компонента, q_r – тепловой эффект реакции.

Состав газов определяется преимущественно из соотношений концентраций окисей фосфора и углерода [3]. Скорость реакций восстановления определяет расход газов и вычисляется как $G_g = \gamma_g w_r$ и зависит от стехиометрических условий:

$$G_g = w_r (5\mu_{CO} + \mu_{P_2}) \mu_{P_2O_5}^{-1},$$

в которых молярные веса оксида фосфора $\mu_{P_2O_5}$ и углерода μ_{CO} .

Цель исследования – построение математической модели процессов формирования шлама при переработке рудного фосфатного сырья в рудно-термических печах с перспективой управления их энергоресурсоэффективностью, на основе использования гидродинамического подхода. Модель должна учитывать теплогидравлические особенности нестационарных состояний фосфорной рудно-термической печи в приближении сосредоточенных параметров, а также перемещение капель расплава с барботирующими газами, что является главной причиной появления пыли в расплаве.

Материалы и методы исследования

Подача шихты в реакторную зону происходит непрерывно и, благодаря наличию режима саморегуляции объекта, обеспечивается состоянием равновесия системы [4]. Природа этого явления объясняется тем, что температура и геометрия (высота) коксового слоя определяет формирование геометрии ванны РТП.

На границах дисперсной и жидкой фазы происходит процесс расплавления шихты

при барботировании печных газов. На этой границе отдельные твердые фракции шихты имеют температуру плавления, в то время как газы, выходящие из жидкой фазы, имеют температуру выше температуры плавления. Эти условия дают возможность найти расход шихты, основываясь на тепловом балансе фазового перехода:

$$(G_1 + G_2) q_L = \alpha F (T_l - T_L),$$

где T_L – температура плавления, α – коэффициент теплоотдачи, F – поверхность теплообмена в зоне плавления, q_L – удельная теплота расплава шихтовых материалов.

Создаваемый слоем шлакового расплава, шихты и кокса гидравлический напор создает условия для слива шлака (непрерывного или периодического) через шлаковые летки с расходом

$$G_{sl} = f(\xi) n_l S_l w_p,$$

где w_l – выходная скорость шлака из летки, $f(\xi)$ – функция сопротивления при протекании шлака через летки.

Из соотношения

$$G_{sl} = n_l S_l \rho_{sl} W_{sl} / \sqrt{1.5 + \xi l_l / d_l}$$

возможно определить расход шлака при сливе из печи, который определяется согласно гидродинамическим законам, которые описывают закономерности истечения жидкости из сосуда через трубу конечной длины l_p , где d_l – диаметр летки, ξ – коэффициент сопротивления, ρ_{sl} – плотность шлака, $n_l = 0, 1, 2$ – количество действующих леток; $S_l = 0.25\pi d_l^2$ – площадь поперечного сечения отверстия летки, W_{sl} – скорость вытекания шлака через отверстие летки. Коэффициент сопротивления рассчитывают по формуле, учитывающей μ_{sl} – динамическую вязкость шлака:

$$\xi = (64\mu_{sl}) / (W_{sl} d_l \rho_{sl}).$$

Формула расчета скорости истечения шлака через летку:

$$W_{sl} = \sqrt{2g\rho_{sl}^{-1}(\rho_{sl}h_p + \rho_c h_c(1 - \varepsilon_c) + \rho_s h_s(1 - \varepsilon_s))},$$

где ε_c – порозность слоя кокса, ρ_s – плотность материала шихты, ε_s – порозность слоя шихты, h_c – высота зоны кокса, h_p – высота зоны расплава, h_s – высота шихтовой зоны, которые определяются по формулам

$$h_p = M_p / (\rho_{sl} h_f),$$

$$h_c = M_c / (\rho_c S_f (1 - \varepsilon_c)),$$

$$h_s = M_s / (\rho_s S_{fl} (1 - \varepsilon_s)),$$

$$S_{fl} = S_f - 3\pi r_{el}^2,$$

где r_{el} – радиус электродов плавильной печи.

Выражения для противоточного энергообмена используются для нахождения температур газов t_g и шихты t_s в шихтовой зоне плавильной печи. Необходимо понимать, что скорость процессов химических превращений в реакционной зоне на порядок ниже скорости конвективного теплопереноса в соответствующей зоне; это позволяет считать выполненным условие стационарности [5, 6]. Для противоточного теплообменника возможно определить температуру шихты на входе в реакционную зону, которая записана с помощью операторного матричного соотношения для t'_s :

$$\begin{pmatrix} t''_g \\ t''_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-z_1 & z_1 \\ z & 1-z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t'_g \\ t'_s \end{pmatrix},$$

где
$$z = \frac{G_g c_g}{G_s c_s} \frac{\exp\left[\frac{(\alpha_v S_f h_s)/(G_g c_g) \left(1 - (G_g c_g)/(G_s c_s)\right)}{1} - 1\right]}{\exp\left[\frac{(\alpha_v S_f h_s)/(G_g c_g) \left(1 - (G_g c_g)/(G_s c_s)\right)}{1} - (G_g c_g)/(G_s c_s)\right]},$$

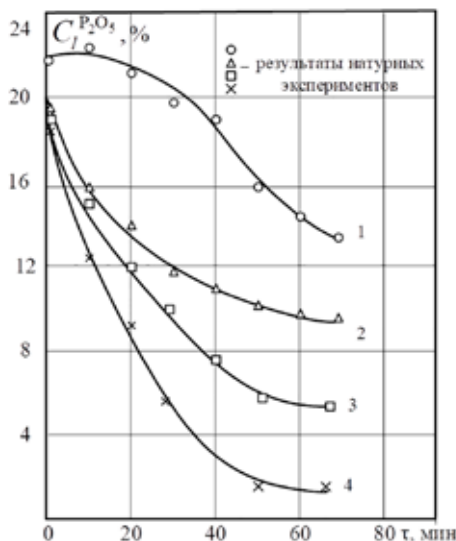
$$z_1 = z (G_s c_s)/(G_g c_g),$$

где t'_s – температура шихты на выходе из реакционной зоны, α – коэффициент теплоотдачи, t'_g, t''_g – температуры газа соответственно на выходе и входе в реакционную зону, d_s – средний диаметр частиц шихты, $\alpha_v = \alpha(1 - \epsilon)/d_s$ – объемный коэффициент теплообмена между шихтой и газом. Система является довольно инерционной, в реакционной зоне время реагирования пятиоксида фосфора P_2O_5 может длиться, согласно экспериментальным данным, достаточно продолжительное время, достигающее одного часа и более. Поэтому прогнозирование поведения системы при воздействиях различного рода является весьма важной задачей. Результаты вычислительных экспериментов подтвердили актуальность построенных математических моделей и их соответствие данным натурального эксперимента (рисунок).

В реакционной зоне возможно записать аппроксимированную зависимость, описывающую выделение энергии:

$$P_e = P_{e1} + (\rho_e j_e^2 \cdot 10^4)/(b_l \cdot b_z)(1 - \exp[-\beta(y - y_1)]),$$

где β – эмпирический коэффициент, P_{e1} – мощность на электродах в положении y_1 , P_e – мощность на электродах в положении y .



Зависимость концентрации P_2O_5 в реакционной зоне от температуры при различных значениях температуры расплава, где 1 – 1400 °С, 2 – 1450 °С, 3 – 1500 °С, 4 – 1550 °С

Динамическую математическую модель плавильной рудно-термической фосфорной печи возможно описать системой уравнений в приближении сосредоточенных параметров [7]. Предлагаемый подход может быть распространен без существенных изменений и на технологии, тождественные процессу производства фосфора по своему механизму протекания.

Эта же система уравнений при условии замены производных нулевыми значениями подходит и для описания стационарного режима состояния печи.

Предложенная математическая модель позволяет симитировать состояние рудно-термической печи в различных ситуациях и режимах, а также при различных значениях параметров управления проанализировать поведение объекта [8, 9].

Основываясь на рассмотренных выше уравнениях сохранения массы и энергии, возможно провести описание стационарных состояний фосфорной рудно-термической печи

в приближении сосредоточенных параметров для реакционной зоны плавильной печи.

Расход шихты, попадающей в плавильную рудно-термическую печь, возможно определить режимом работы печи $G_s = G_f + G_{si} + G_c$. Шихта состоит из кремнистых разновидностей фосфоритов, кварцитов и кокса – восстановителя фосфора. Дозировки компонентов кварцитов, кокса, фосфоритов относительно расхода шихты возможно определить по соотношению:

$$1 = G_f/G_s + G_{si}/G_s + G_c/G_s = g_f + g_{si} + g_c,$$

где $G_g = g_g G_s$ – расход газа, $G_f = g_f G_s$ – расход фосфорита, g_i – массовые доли ком-

понентов шихты, $G_c = g_c G_s$ – расход кокса, $G_{si} = g_{si} G_s$ – расход кварцита.

Проанализировав стехиометрию реакции $P_2O_5 + 5C \rightarrow 5CO + P_2$ определили, что при условии небольшой концентрации P_2O_5 в шлаке коэффициент расхода шихты относительно расхода газа возможно представить в виде:

$$g_g \approx (C_f^{P_2O_5} g_f + g_c) / (g_f + g_{si} + g_c) \approx C_f^{P_2O_5} g_f + g_c < 1,$$

где $C_f^{P_2O_5}$ – содержание пятиоксида фосфора в руде.

Из уравнения баланса P_2O_5 и кокса можно получить:

$$\omega_R = g_c G_c / \gamma_c, C_l^{P_2O_5} = (g_f C_f^{P_2O_5} - g_c / \gamma_c) / (1 - g_g).$$

При $g_c = 5\mu_c / \mu_{P_2O_5} = 0.4$; $\mu_c = 12$; $\mu_{P_2O_5} = 152$; $C_f^{P_2O_5} \approx 0.25$.

$$C_l^{P_2O_5} = \begin{cases} (g_f C_f^{P_2O_5} - g_c / \gamma_c) / (1 - g_g), & \text{если } g_f C_f^{P_2O_5} > g_c / \gamma_c \\ 0, & \text{если } g_f C_f^{P_2O_5} \leq g_c / \gamma_c \end{cases}.$$

В реакционной зоне можно принять без больших погрешностей среднюю концентрацию P_2O_5 : $\bar{C}_l^{P_2O_5} \approx 0.5 C_f^{P_2O_5}$.

В объеме печи возможно записать энергетический баланс:

$$G_s c_{ps} t_s' + \xi_e P_{el} = G_l c_{pl} t_R + G_g c_{pg} t_g^* + \omega_R Q_R + (G_s - G_c) Q_L,$$

где t_l, t_R – температура плавления и расплава; Q_R – тепловой эффект реакции восстановления, ω_R – скорость и реакции восстановления, t_s' – температура рудного сырья на входе в печь, ξ_e – доля печи, используемая для реакционной зоны, c_{pg} – теплоемкость газа, c_{ps} – теплоемкость шихты, c_{pl} – теплоемкость шлака, t_g^* – температура печных газов в пространстве сводов печи, P_{el} – мощность печи, Q_L – теплота плавления.

Балансы компонентов массы для пятиоксида фосфора:

$$G_f C_f^{P_2O_5} / \rho_f - \omega_R = G_l C_l^{P_2O_5} / \rho_l,$$

где $C_l^{P_2O_5}$ – концентрация пятиоксида фосфора в расплаве, $C_f^{P_2O_5}$ – содержание пятиоксида фосфора в руде; для кокса: $G_c - \gamma_c \omega_R = 0$. Общий массовый баланс возможно записать как: $G_s - G_g = G_l$.

Анализ соотношений, которые при применении комбинированного подхода будут в объеме печи учитывать распределенность параметров, позволит получить необходимые зависимости для проведения комплексного анализа процессов, протекающих в высокотемпературной зоне [10, 11]. На границе фазовых переходов соотноше-

ние энергетического баланса возможно записать в виде

$$(2S_f \lambda_t (t_R - t_L)) / h_{cz} - G_g c_{pg} t_g + G_s c_{ps} t_s'' - (G_s - G_c) Q_L = 0.$$

Учитывая условия энергетического баланса энергии в зоне шихты, возможно записать приближенное равенство $G_g c_{pg} t_g \approx G_s c_{ps} t_s''$. Тогда для расчета расхода шихты справедливо будет записать:

$$G_s = (2S_f \lambda (t_R - t_L)) / (h_{cz} (1 - g_c) Q_L).$$

В реакционной зоне, из усредненного выражения записи уравнения энергетического баланса, возможно записать зависимость

$$G_s c_{ps} t_L + \xi_e P_{el} = G_l c_{pl} t_R + G_g c_{pg} t_R + \omega_R Q_R,$$

а учитывая мощность, получим

$$P_{el} = U_e^2 / (\xi_{el} h_{cz}),$$

где $\xi_{el} = \rho_{el} / S_f$.

Выражение для температуры в зоне реакции возможно записать как

$$t_R = (\xi_1 U_e^2) / (h_{cz} G_s) + \xi_2,$$

где $\xi_1 = [\xi_{el}(1 - g_c) c_{pl}]^{-1}$, $\xi_2 = c_{pl} \cdot ((c_{ps} - g_g c_{pg}) t_L + (Q_R g_c) / \gamma_c) / (1 - g_c)$.

Подставив в уравнение для температуры выражение для расхода шихты, получим следующее суммирующее выражение:

$$t_R = 0.5 \cdot \left((t_L + \xi_2) + \sqrt{(t_L + \xi_2)^2 + 4 \left[\xi_2 / \xi_\lambda U_e^2 - \xi_2 t_L \right]} \right).$$

Мощность печи возрастает при повышении напряжения и, наоборот, с ростом доли кокса в шихте убывает. При увеличении дозировки кокса температура внутри печи снижается, а с повышением напряжения начинает возрастать [12]. В макропредставлении скорость протекания химической реакции восстановления примет вид

$$\omega_R = k_0 S_c (1 + M_k)^m C_l^{P_2O_5} \exp(-E / RT_R),$$

где r_{cp} – средний радиус частиц, M_c – масса кокса в реакционной зоне, k_0 – предэкспоненциальный множитель, равный $k_0 = 1,6 \times 10^8$ кг/(м²с), $S_c = 3 \cdot (M_c A_f) / (\rho_c r_{cp})$ – площадь поверхности коксовых частиц, A_f – коэффициент формы частиц кокса, E – энергия активации, $E / R = 48000$ К⁻¹.

Условия протекания реакции восстановления фосфора определяют расход газа:

$$G_R = \gamma_0 k_0 \left[(6 M_{cz} (1 - \varepsilon_c)) / (\rho_c d_c) \right] C_l^{P_2O_5} \cdot \exp[-E / RT_R] (1 - M_k)^m.$$

Возможно записать линеаризованную аррениусовскую функцию для расхода газа:

$$G_g = h_{cz} C_l^{P_2O_5} (a + b t_R),$$

где $a = \gamma_g k_0 S_f 6(1 - \varepsilon_c) d_c^{-1} \cdot \exp(-E / RT^*) [1 - t^*(-E / RT^*)]$,

$b = \gamma_g k_0 S_f 6(1 - \varepsilon_c) d_c^{-1} \cdot \exp(-E / RT^*)$.

Производительность, запыленность и, соответственно, расход газа возрастут при увеличении напряжения и, напротив, будут уменьшаться при увеличении внесения кокса в печь. Формирование коксовой зоны определяется на основании коксового баланса в печи, который учитывает высоту коксовой зоны, зависящую от условий расходования и поступления кокса:

$$h_{cz} = \sqrt{(2 S_f \lambda_t (t_R - t_L) g_c) / ((1 - g_c) \gamma_c^2 C_l^{P_2O_5} (a + b t_R))}.$$

Размеры коксовой зоны увеличиваются при увеличении подачи кокса, а ее уменьшению способствует повышение напряжения [13].

Из выражения энергетического баланса шихтовой зоны на выходе из печи получается температура газов:

$$t_g^* = t_R \left((h_{cz} C_l^{P_2O_5} (a + b t_R) c_{pg} + 3 \alpha_g (1 - \varepsilon_s) d_s^{-1}) S_f (H - h_{cz}) (1 - g_g c_{pg} c_{ps}^{-1}) \right).$$

Отсюда следует положительное влияние напряжения и негативное воздействие подачи кокса. Справедливым будет считаться: $h_{cz} + h_s \approx H$. Согласно закону сохранения масс возможно записать выражение для расхода шлака через летки:

$$G_l = n_{let} S_{let} \rho_l W_l,$$

где H – высота ванны печи, M_{cz} – масса слоя кокса, $h_{cz} = M_{cz} / (\rho_c S_f (1 - \varepsilon_c))$ – высота реакционной зоны.

С учетом распределенности концентрация реагента на выходе из печи будет

$$C_{lb}^{P_2O_5} = C_f^{P_2O_5} \sqrt{(1 - (a + b t_R) h_{cz} / ((2gH) n_{let} S_{let} k_{let}))}.$$

Приняв во внимание, что производительность по фосфору связана с расходом газа через постоянный стехиометрический коэффициент, из балансового уравнения энергии в печи возможно получить удельный расход электроэнергии, являющийся основным показателем энергоресурсоэффективности плавильной печи [14].

Снижение потерь продукта, обусловленных шлакообразованием, обеспечиваются развитая коксовая зона и условия повышенной температуры [15]. Для расчета удельного расхода электроэнергии запишем выражение

$$b_{el} = (\xi_e P_{el}) / G_g = (G_s / G_g - 1) c_{pl} t_R + \gamma_g Q_R + G_s / G_g (1 - g_c) Q_L + c_{pg} t_g^* - G_s / G_g c_{ps} t_s^*.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Проанализировав полученные математические модели, возможно провести описание основных тепловых процессов, протекающих во время работы плавильной рудно-термической печи. Управляющие параметры, такие как напряжение на электродах и дозировка кокса, влияют на удельный расход энергии и зависят от промежуточных технологических показателей: расхода газа, высоты коксовой зоны, расхода шихты, температуры в реакционной зоне. Снижение дозировки кокса снижает удельный расход энергии, как и при повышении напряжения на электродах. Для нахождения оптимальных условий функционирования плавильного оборудования возможно минимизировать функции удельного расхода, принимая во внимание ограничения, которые необходимо учесть по всем показателям, например используя метод штрафных функций. Важным параметром является соотношение напряжения и мощности, определяющееся по высоте коксовой зоны и зависящее от режима функционирования печи. Сопротивление зоны реагирования характеризует размер коксовой зоны, откуда весьма сложный механизм формирования электрического режима печи становится понятным.

Вторая из предложенных моделей характеризует унос частиц в рудно-термической печи барботирующими газами из расплава и описывает процесс образования шлама, который образуется при появлении пылевых отходов техногенного характера, образующихся при переработке апатит-нефелиновых руд и являющихся основной причиной появления загрязнения фосфора шламовыми продуктами в зоне вы-

хода из печи. Она основана на том факте, что главной причиной образования пыли в расплаве рудного фосфорсодержащего сырья является отвердевание уносимых барботирующими газами капель расплава и образование из них твердых частиц наряду с процессами возгонов, конденсации и испарения вместе с химическими реакциями в газовой фазе. На степень запыленности расплава будут влиять скорость движения газа, поверхностное натяжение, плотность расплава, химический состав шихты, электрическое сопротивление расплава и т.д. При проведении моделирования зависимости уноса капель от критерия Вебера необходимо учесть наличие режимного параметра для рудно-термической печи, а также зависимость массы капель в единице массы газа от скорости истечения газа в вертикальном канале на колоснике печи.

В единице массы газа зависимость массы капель в единице массы газа возможно записать как

$$g_l \approx c \cdot \rho_l / \rho_g \cdot \sqrt{\text{Bo}_l} (\text{We}^{0.33} \text{Bo}_\delta^{-1})^n, \quad (5)$$

где c – константа, g_l – масса капель в единице массы газа, ρ_l – плотность жидкости, ρ_g – плотность газа, $c = 50$, We – критерий Вебера, Bo – критерий Бонда, $n = 2 / s$, где s – дисперсия логарифмически нормального распределения, $s \approx 1$. При этом $\text{Bo} = \Delta\rho / g\sigma^{-1}$, $\text{We} = \rho_g W_g^2 \delta \sigma^{-1}$, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы, l, δ – характерный размер системы, g – ускорение свободного падения, $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$.

Полученное выражение для технологических реакторов различных типов обобщает зависимости уноса капель от являющегося режимным параметром критерия Вебера We . В настоящее время существует мнение, что унос жидкости обуславливается «оболочечным» и «струйным» механизмами образования капель при выходе из жидкой фазы газов. Сконцентрированная за счет работы подъемных сил жидкости в нескомпенсированных работой сил трения пузырьках энергия претерпевает преобразование в энергию поверхностного натяжения капель, образуемых при разрыве пленки жидкости. Выражение образования капель над поверхностью жидкости возможно записать в виде

$$G_g / \rho_g \cdot \Delta\rho g l = dn / d\tau \cdot \pi d_k^2 \sigma$$

где l – характерный размер системы, ρ_g – плотность газа, $dn / d\tau$ – скорость образования капель, g – ускорение свободного падения, d_k – диаметр капли, G_g – массовый расход газа.

Преобразуя это выражение, получим

$$g_{i_0} = G_l / G_g \sim \rho_l / (6\rho_g) \sqrt{(\Delta\rho_g l) / \sigma} \sim \rho_l / (6\rho_g) \sqrt{\text{Bo}_l},$$

где g_{i_0} – масса капель в единице массы газа, Bo_l – критерий Бонда по параметру l . Примем, что диаметр капель d_k обусловлен действием сил поверхностного натяжения:

$$d_k \sim \sqrt{\sigma / (\Delta\rho g)}.$$

При диспергировании жидкости под воздействием возмущений со стороны барботирующих пузырьков газов, проходящих через расплав, распределение капель по размерам может быть выражено в виде доли капель, которые имели бы средние размеры меньше, чем характерный, при этом соотношение после разложения в ряд при малых диаметрах d_i будет справедливым: $g_i \approx g_{i_0} (d_i / d_{\text{ш}})^n$, где d_i – диаметр витания капель, $d_{\text{ш}}$ – средний диаметр капель после диспергирования.

Возможно предположить, что в результате выхода на поверхность барботирующих пузырьков будут образовываться обтекаемые ускоренными потоками газа цилиндрические полые пленки из пузырьков, в которых поперечные и продольные колебания пленок вызывают случайные возмущения сил трения. Названные колебания будут определять «струйный» механизм диспергирования. Между средним диаметром при генерации капель и характерным размером системы существует обратно пропорциональная критерию Вебера We взаимосвязь. Возможно приближенно получить из следующего соотношения

$$\xi \rho_g W_g^2 = 8\sigma / d_{\text{ш}},$$

$$d_{\text{ш}} / \delta = 8\xi^{-1} \text{We}_\delta^{-1}.$$

Из баланса сил сопротивления и веса тела возможно определить диаметр витания:

$$d_i / \delta = 0.75 \xi \text{We} \cdot \text{Bo}_\delta^{-1}.$$

Согласно уравнению (5) получим, что режим химического реагирования сказывается на транспорте жидкой фазы из зоны реакции, в основном за счет увеличения скорости газа. Режим работы реакционной зоны зависит от газосодержания, т.е. от количества газовой фазы, температуры, выделяемой мощности, и увеличивает интенсивность процесса образования капель.

Химический состав пыли меняется по ходу прохождения газового тракта в связи с тем, что частицы пыли являются центрами конденсации для возгонов. На долю транспортируемой жидкости влияет состав

жидкой фазы, определяя коэффициент поверхностного натяжения. Если обобщить зависимость уноса капель для различных типов технологических реакторов от критерия Вебера, как режимного параметра, можем записать

$$g_i = c \cdot \rho_l / \rho_g \cdot \text{Bo}_l^{-1.5} \cdot \text{We}^{0.66}.$$

Заключение

Изложенное позволяет сделать вывод, что образование шлама в реакционной зоне печи может регулироваться изменениями режимов, а на их карты целесообразно добавлять линии уровня зависимости потоков с целью учета ухудшения качества продукта, вызванного сопутствующим образованием пыли.

Математическое описание процессов на основании проведенных исследований, протекающих в реакционной зоне рудно-термической печи, может использоваться на следующих этапах проведения изысканий по созданию алгоритмов и методов обеспечивающих повышение энерго- и ресурсоэффективности, техногенной и экологической безопасности, с учетом способов электротермической переработки рудного фосфатного сырья и многостадийного процесса образования шлама, позволяющий учитывать количественные и качественные параметры шихты.

Разработаны использующие гидродинамический подход математические модели, которые позволяют описать процессы шламообразования при термической переработке фосфатного рудного сырья в рудно-термических печах. Проведена валидация результатов проведенных вычислительных экспериментов с натурными, которая позволяет сделать выводы о корректности представленных математических моделей и возможности их использования для всестороннего описания химико-технологических процессов, протекающих в плавильном оборудовании, а также поиске и анализе возможностей рационального использования сырьевых и топливных ресурсов для производства фосфора термическим способом. Предложенные математические модели учитывают теплогидравлические особенности процессов переработки рудного фосфатного сырья, в приближении сосредоточенных параметров описывая процесс образования шлама, который характеризуется явлением уноса шламовых частиц

пузырьками барботирующих расплав газов и загрязнением фосфора-сырца на выходе из печи этими частицами.

Таким образом, математическое моделирование энергоемких химико-технологических процессов дает возможность глубже понимать разнообразные взаимосвязанные температурно-зависимые превращения сырья и выбирать наиболее рациональные подходы к расходованию ресурсов при выборе наиболее энергоэффективных режимов работы оборудования.

Список литературы

1. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Ч. 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61, № 1. С. 11–22.
2. 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.
3. Бобков В.И., Орехов В.А. Исследование аэродинамики полифракционного слоя рудного сырья // Успехи современного естествознания. 2022. № 9. С. 67–72.
4. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Повышение энергоэффективности химико-энерготехнологической системы фосфорного производства // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 2. С. 17–23.
5. Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимов Н.Н. Компьютерная программа для моделирования показателей технического состояния электромеханических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17, № 2. С. 105–119.
6. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10–1. С. 59–63.
7. Бобков В.И., Панченко С.В., Соколов А.М. Выявление потенциала энергоресурсосбережения в электротермических процессах переработки продуктов pelletирования обжиговых машин конвейерного типа в рудно-термических печах // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 6 (90). С. 32–36.
8. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53–57.
9. 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.
10. 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. P. 91–102.
11. Бобков В.И., Дли М.И., Панченко С.В. Обобщенная структурно-функциональная модель инжиниринга и управления экологически безопасной переработкой отвалов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 48–52.
12. 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. № 8 (11). P. 600–603.
13. 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. Т. 143, № 1. С. 599–608.
14. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10–1. С. 59–63.
15. 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, Is. 1 (91). P. 22–31.