

УДК 536.42

ОБРАЗОВАНИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МНОГОФАЗНЫХ РЕАКТОРАХ¹

© 2021 г. В. П. Мешалкин^а, С. В. Панченко^б, М. И. Дли^б, Е. И. Лобанева^с, *

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

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

^сНациональный исследовательский университет “МЭИ”, Москва, Россия

*e-mail: lobaneva94@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2021 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 23.03.2021 г.

Рассмотрены вопросы образования пылевых частиц в высокотемпературных технологических реакторах. Акцент сделан на процессы, протекающие в электротермических рудовосстановительных печах фосфорного производства, когда пыль служит источником шлама, загрязняющего продукт. Предложена модель формирования пыли на основе гидродинамического взаимодействия пузырьков газа с жидкостью при их выходе на границе раздела фаз, когда разрушение пузырьков приводит к появлению капель, уносимых потоком газа. Рассмотрение положений устойчивости для максимальных возмущений в цилиндрических струях жидкости дает возможность оценить размеры капель, над поверхностью жидкости и получить качественные и количественные оценки для капель, уносимых потоком газа. Аналитические зависимости для пылеобразования в фосфорной печи позволяют связать содержание пыли с режимными параметрами, характеризующими работу печей – температурой в зоне реакции, свойствами расплава, управляющими параметрами – напряжением на электродах и дозировкой кокса. Расчеты, проведенные на основе полученных соотношений, обнаруживают удовлетворительную корреляцию с экспериментальными данными по образованию пыли в фосфорных, мартеновских печах, а также барботажных теплообменниках установках. Представлена модель теплофизических процессов в электротермическом восстановительном реакторе в приближении сосредоточенно-распределенных параметров, учитывающая взаимодействие зон различного фазового состава, позволяющая проводить анализ режимов работы реактора от основных управляющих параметров – напряжения на электродах и доли кокса-восстановителя. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации режимов работы оборудования в пределах допустимых выбросов пыли.

Ключевые слова: технологический реактор, гетерогенная реакция, гидродинамика струй жидкости, формирования капель, разрыв пузырьков, гидродинамика системы газ–жидкость, гидродинамика каплеобразования, модель формирования пыли

DOI: 10.31857/S0040357121040102

ВВЕДЕНИЕ

Процессы химической электротермии, такие как получение карбида кремния, фосфора и т.д., являющиеся реакциями восстановления и ряд реакций растворения протекают с выделением продуктов в газовой фазе. В электротермических рудовосстановительных реакторах по производству фосфора пыль является загрязнителем продукта – фосфора, в мартеновских печах, в производстве карбида кальция образование пыли нежелательно с точки зрения экологии, в испарительных, барбо-

тажных, контактных теплообменных устройствах унос влаги – это потери чистого теплоносителя.

Одной из основных причин образования пыли при работе промышленных гетерогенных реакторов (фосфорных, мартеновских, карбидных и других печей) является унос капель расплава барботирующими газами и их отвердевание наряду с химическими реакциями в газовой фазе с образованием твердых частиц и процессами испарения и конденсации возгонов. Число сторонников гидродинамического подхода [1–3] с гипотетическим взглядом на проблему превышает количество последователей испарительного механизма [4–6] и предлагающих учитывать оба механизма [7–9]. Понятно, что при наличии теории, адекват-

¹ Специальный выпуск: “К юбилею Академика РАН Валерия Павловича Мешалкина”.

ватно описывающей экспериментальные исследования, можно говорить о доле участия каждой составляющей. Основным аргумент в пользу гидромеханики – это отсутствие пыли над зеркалом расплавленного металла, где нет потоков газа, и, совсем уж очевидно, брызгообразование и каплеунос в барботажных теплообменниках, где нет возгонов.

Печные газы рудовосстановительной фосфорной печи содержат до 200 г/м^3 твердых пылевых частиц. Этот нежелательный компонент – источник образования шлама в конденсаторах фосфора и снижает качество продукта. Наиболее вероятным механизмом образования пыли является формирование капель расплава при выходе газа из реакционной зоны печи. В пользу этого механизма говорят результаты анализа химического состава пыли, который характерен для расплава в зоне плавления, когда процесс восстановления еще не протекал. Высокое содержание K_2O (до 20%) в пробах печной пыли можно отнести за счет процессов возгонки и последующей коагуляции на пылевых частицах [6]. Кроме того, режим работы печи, т.е. ее мощность существенным образом влияет на запыленность Z [6]. Эмпирически получена одна из абсурдных зависимостей, где с очевидностью следует зависимость электросопротивления от мощности через температуру, что недопустимо в уравнениях регрессии:

$$Z = 125\varphi q_v^{1/6} \rho_{el}^{1/2} - 62.5, \quad (1)$$

где ρ_{el} – удельное электрическое сопротивление расплава; φ – постоянная, характеризующая геометрическое подобие проводников; q_v – объемная мощность печи.

Химический состав шихты также влияет на запыленность посредством изменения удельного электрического сопротивления и коэффициента поверхностного натяжения расплава, который аддитивно зависит от содержания и свойств отдельных компонентов [6].

Механизм образования пыли можно трактовать исходя из того, что пузыри газа в результате своего разрыва образуют мельчайшие капли. Поэтому при увеличении расхода газа резко усиливается пылеобразование.

В экспериментах [1] было установлено, что процесс разрыва пузырей составляет неотъемлемую часть механизма пылеобразования, и образованию пыли всегда предшествовало появление брызг металла. В тех случаях, когда брызг не наблюдалось, отсутствовало и образование дыма.

Согласно современным представлениям, транспортирующий унос жидкости обуславливается “струйным” и “оболочечным” механизмом образования капель при выходе газов из жидкой фазы [10].

По данным [1], основная масса брызг образуется за счет разрыва небольшой части тонкой поверхностной пленки, выступающей над расплавом. В момент ее разрыва мельчайшие брызги устремляются вверх, а окружающая пузырь жидкость стремится заполнить возникшую пустоту, одновременно вызывая на поверхности расплава кольцевую волну. Происходит так называемое схлопывание поверхностного пузырька. Смыкаясь, он создает кумулятивную струю (струи Рэлея) – выбрасывает вверх столбик воды, от подножья которого распространяется волна. Выброс расплава также сопровождается образованием брызг, крупные капельки возвращаются обратно в ванну, мелкие капельки удаляются в газовую фазу.

По [1] 60% всей образующейся пыли представляют собой мелкие капли разорвавшейся при всплывании пузыря газа пленки расплава. На долю паров и оксидов приходится около 27% от массы пыли [1].

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЫЛИ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим образование капель над поверхностью жидкости полагая, что газ несет энергию, сконцентрированную в пузырьках за счет подъемных сил жидкости. Эта энергия трансформируется в энергию поверхностного натяжения капель, образуемых при разрыве пленки жидкости [11].

Баланс энергии в этом случае можно записать как

$$\frac{G_g}{\rho_g} \Delta \rho g l = \frac{dn}{d\tau} \pi d_k^2 \sigma, \quad (2)$$

где $\frac{dn}{d\tau}$ – скорость образования капель; l – характерный размер системы; G_g – массовый расход газа; ρ_g – плотность газа; ρ_l – плотность жидкости; d_k – диаметр капли; σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы; g – ускорение свободного падения; $\Delta \rho = \rho_l - \rho_g$.

Преобразуем это выражение:

$$\frac{G_g}{\rho_g} \Delta \rho g l = \frac{dn}{d\tau} \frac{\pi d_k^3 \rho_l^3}{6 d_k \rho_l} \sigma = G_{lk} \frac{6 \sigma l}{d_k \rho_l l}$$

Получим

$$g_{l_0} = \frac{G_{lk}}{G_g} \sim \frac{\rho_l}{6 \rho_g} \frac{d_k \Delta \rho g l^2}{\sigma} \sim \frac{\rho_l}{6 \rho_g} \frac{d_k}{l} \text{Bo}_l, \quad (3)$$

где g_{l_0} – масса капель в единице массы газа над жидкостью; G_{lk} – масса образованных в единицу

Таблица 1. Зависимость уноса капель расплава при продувке

$(\rho_l/\rho_g) \times 10^{-3} \text{ (кг/м}^3\text{)/(кг/м}^3\text{)}$	0.83	1.0	1.25	1.67	2.5	5.0
g_{t0}	36	37	38	42	50	80

Таблица 2. Функция распределения частиц пыли по размерам на колошнике фосфорной печи

$g(d)$	5	15	35	57	77	87	92	95	97	98	99	100
$d, \text{ мкм}$	0.5	1	3	5	8	12	20	30	50	100	150	200

времени капля жидкости; $Bo_l = \frac{\Delta\rho g l^2}{\sigma}$ – критерий Бонда по параметру l .

Оценки по (3) дают значение доли уноса порядка 10, что практически совпадает с экспериментальными значениями $g_{t0} \approx 4$ для системы воздух–вода.

Экспериментальные результаты по уносу жидкой фазы в металлургических системах при продувке расплава газом приведены в табл. 1, где просматривается линейная зависимость уноса у поверхности от отношения плотности жидкости к плотности газа [12]. Эта же пропорция характерна для соотношения (3).

При диспергировании капли распределены по размерам. Наиболее характерной является зависимость, экспериментально найденная в виде распределения Розина–Рамлера. Интегральная функция распределения частиц пыли по размерам для фосфорных печей имеет значения [6], представленные в табл. 2.

Доля капель с диаметрами, меньше характерного, может быть выражена интегрированием функции плотности распределения в соответствующих пределах. Кроме того, в этом случае справедливо упрощенное соотношение после разложения в ряд при малых d_t :

$$g_t = g_{t_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{d_t}{d_{dis}}\right)^n \right] \approx g_{t_0} \left(\frac{d_t}{d_{dis}}\right)^n, \quad (4)$$

где d_t и d_{dis} – диаметр витания и средний диаметр капель после диспергирования.

Показатель степени $n = 2/s$, где s – дисперсия логарифмически нормального распределения ($s \sim 1$).

Диаметр витания определяется из баланса сил сопротивления и веса тел:

$$\Delta\rho g \left(\frac{\pi d_t^3}{6}\right) = \left(\frac{\pi d_t^2}{4}\right) \xi \frac{\rho_g v_g^2}{2} \approx 3\pi d_t \rho_g v_g v_g. \quad (5)$$

Откуда для малых скоростей газов:

$$\frac{d_t^2}{\delta^2} = 18 \left(\frac{\rho_g v_g^2 \delta}{\sigma}\right)^{0.5} \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g \delta^2}\right) \left(\frac{v_g \rho_g}{\sigma^{0.5} \delta^{0.5}}\right),$$

или

$$\frac{d_t}{\delta} = \sqrt{18} We^{0.25} Bo^{-0.5} Lp_\delta^{-0.25}. \quad (6)$$

где $We = \frac{\rho_g v_g^2 \delta}{\sigma}$ – критерий Вебера; $Bo = \frac{\Delta\rho g \delta^2}{\sigma}$ –

критерий Бонда; $Lp_\delta = \frac{\sigma \delta}{v_g^2 \rho_g}$ – эквивалентный критерий Лапласа.

Если считать, что в результате выхода пузырьков на поверхность образуются цилиндрические полые пленки, которые обтекаются ускоренными потоками газа из пузырьков, то случайные возмущения сил трения вызывают поперечные и продольные колебания пленок. Из-за развития этих колебаний осуществляется “струйный” механизм диспергирования. Проблемам распада струй и диспергированию посвящены множество работ [13–17]. Взаимосвязь между средним диаметром при генерации капель и характерным размером системы обратно пропорциональна критерию Вебера. Эту зависимость приближенно можно оценить из соотношения

$$\frac{\rho_g v_g^2}{2} \sim 4 \frac{\sigma}{d_{dis}}, \quad \frac{d_{dis}}{\delta} = 8\chi We_\delta^{-1}, \quad (7)$$

где δ – характерный размер системы; χ – коэффициент пропорциональности.

Для обтекания жидкой струи газами имеет место соотношение

$$d_{dis}/\delta \sim We_\delta^{-0.5}.$$

Более обоснованно диаметр капли получают исходя из рассмотрения неустойчивости струи жидкости, испытывающей радиальные возмущения, считая, что, струя распадается на капли, объем каждой равен объему вращения синусоиды волны около оси, проходящей через ее минимум [16]:

$$d_{dis} = \left(\frac{9\delta^2}{4} \lambda_0\right)^{1/3}.$$

Связь между критерием Вебера и волновым числом k_0 в этом случае:

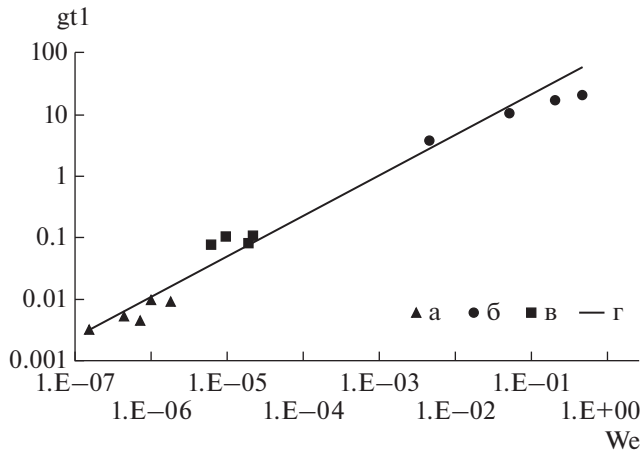


Рис. 1. Зависимость комплекса $g_t l$ от критерия Вебера: (а) – эксперимент [16–19] (фосфорные печи); (б) – эксперимент [22] (контактный теплообменник); (в) – эксперимент [20, 21] (мартеновские печи); (г) – теория.

$$We_\delta = 1.5k_0\delta = \frac{3\pi\delta}{\lambda_0},$$

где $\lambda_0 = \frac{3\pi\delta}{We_\delta}$ – длина волны наиболее быстро растущего возмущения.

Тогда

$$\frac{d_{dis}}{\delta} = \sqrt[3]{\frac{27\pi}{4} We_i^{-0.33}}. \quad (8)$$

Таким образом, в зависимости от режима генерации капель имеет место диапазон показателей степени для скорости газа.

Тогда принимая процесс дробления струй на основе строгих положений устойчивости, получим

$$g_t = c \frac{\rho_l}{\rho_g} Vo_l We_\delta^{0.83} Vo_\delta^{-1} Lp_\delta^{-0.5}. \quad (9)$$

Безразмерная форма уравнения позволяет применять его для систем с различными свойствами.

Проверка адекватности модели образования пыли и каплеуноса. На рис. 1 приведено сопоставление экспериментальных данных [18–24, 31, 32] и рассчитанных значений для уноса пыли в фосфорных, мартеновских печах и уноса капель воды в контактных теплообменниках. Коэффициент c определяется подбором. За характерный размер в газожидкостных системах обычно полагают постоянную Лапласа:

$$l_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho g}}, \quad (10)$$

где l_σ – постоянная Лапласа (капиллярная).

Для более наглядного графического представления результатов соотношение (9) преобразовано к виду

$$g_t \frac{\rho_g}{\rho_l} Lp_\delta^{0.5} = c We^{0.83}. \quad (11)$$

Коэффициент $c = 100$. Обозначим $g_t l = g_t \frac{\rho_g}{\rho_l} Lp_\delta^{0.5}$,

тогда $g_t l = c We^{0.83}$.

Нижняя серия точек для уноса пыли в мартеновских печах, средняя – для фосфорных, верхняя для барботажных теплообменников.

Таким образом обнаруживается удовлетворительное совпадение данных эксперимента с теоретической кривой в широком диапазоне изменения параметров в обобщенном представлении для разных агрегатов.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОБРАЗОВАНИЕ ПЫЛИ

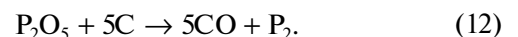
Рассмотрим задачу на примере фосфорной печи, модель которой, учитывающая полную взаимосвязь всех параметров, характеризующих режимы функционирования, проанализирована в [25].

Описание стационарных состояний фосфорной электротермической рудовосстановительной печи в приближении сосредоточенных параметров для реакционной зоны в соответствии с фазовым составом и механизмом физико-химических превращений базируется на представлении объекта в зональном виде, когда ванна реактора для восстановления фосфора условно подразделяется на следующие зоны: шихтовая, плавления, углеродистая, шлака, ферросплава.

Процессы тепло и массопереноса оказывают существенное влияние на качество продукта (температура газа на выходе из печи не должна быть ниже температуры конденсации фосфора, вынос твердых частиц газом должен быть минимальным для предотвращения образования шлама и т.п.) и на надежность работы реактора (температура свода, наличие слоя гарнисажа и т.п.). Учет энергетического взаимодействия различных зон реактора дает возможность отразить такую особенность, как саморегулирование.

Показатели экономичности, надежности работы элементов печи и показатели качества получаются из описания процессов во взаимосвязи для всех зон.

При описании используется стехиометрия реакции восстановления фосфора:



Анализ стационарных состояний электротермического реактора для восстановления фосфо-

ра в приближении сосредоточенных параметров базируется на уравнениях сохранения массы и энергии.

Общий баланс массы, покомпонентные балансы массы – для пятиоксида фосфора, для кокса имеют следующий вид:

$$G_s - G_g = G_1, \quad (13)$$

$$G_f C_f^{p2o5} / \rho_f - \omega_R = G_1 C_1^{p2o5} / \rho_1, \quad (14)$$

$$G_c - g_c \omega_R = 0. \quad (15)$$

Баланс энергии в печи:

$$G_s c_{ps} t'_s + \xi_e P_{el} = G_1 c_{pl} t_R + G_g c_{pg} t_g^* + \omega_R Q_R + (G_s - G_c) Q_L. \quad (16)$$

Баланс энергии на границе фазового перехода:

$$2S_f \lambda_t (t_R - t_L) / h_{cz} - G_g c_{pg} t_g + G_s c_{ps} t_s'' - (G_s - G_c) Q_L = 0. \quad (17)$$

Электрическая мощность, потребляемая реактором:

$$P_{el} = U_{el}^2 / (\xi_{el} h_{cz}), \quad (18)$$

где $\xi_{el} = \rho_{el} / S_f$.

Скорость химической реакции восстановления в макропредставлении имеет вид

$$\omega_R = k_0 S_c (1 + M_k)^m C_1^{p2o5} \exp(-E/RT_R), \quad (19)$$

где C_f^{p2o5} – содержание пятиоксида фосфора в руде; C_1^{p2o5} – концентрация пятиоксида фосфора в расплаве; G_s, G_1, G_g – расход шихты, шлака, газа; ρ_f – плотность материала шихты; ρ_1 – плотность жидкости-расплава; c_{ps}, c_{pl}, c_{pg} – теплоемкость шихты, шлака, газа; t_L, t_R – температура плавления и расплава; ω_R, Q_R – скорость и тепловой эффект реакции восстановления; P_{el}, ξ_e – мощность печи и ее доля используемая для реакционной зоны; U_{el} – напряжение на электродах; Q_L – теплота плавления; t'_s – температура шихты на входе в печь; t_g^* – температура печных газов в подсводовом пространстве. S_f – площадь поверхности фазового перехода; $S_c = M_{cz}(6(1 - \epsilon_c)/d_c)/\rho_c$ – площадь поверхности коксовых частиц; E – энергия активации; k_0 – предэкспоненциальный множитель. t_s'' – температура шихты на входе в реакционную зону.

Баланс энергии в шихтовой зоне и условия на границе фазового перехода представлены в приближении распределенных параметров в одномерной постановке. Из системы уравнений, которая является существенно нелинейной, при линеаризации арениусовской зависимости можно

получить основные соотношения для анализа показателей реактора от управляющих параметров – дозировки кокса и напряжения на электродах.

Расход газа определяется условиями протекания реакции восстановления фосфора:

$$G_g = \gamma_g k_0 [M_{cz}(1 - \epsilon_c)6/(\rho_c d_c)] C_1^{p2o5} \times \exp[-E/RT_R] (1 - M_k)^m. \quad (20)$$

Удельный расход электроэнергии:

$$b_{el} = \zeta_e P_{el} / G_g = (G_s / G_g - 1) c_{pl} t_R + g_g Q_R + G_s / G_g (1 - g_c) Q_L + c_{pg} t_g^* - (G_s / G_g) c_{pg} t_g'', \quad (21)$$

где g_i – массовые доли компонентов шихты; $G_g = g_g G_s$ – расход газа, $G_f = g_f G_s$ – расход фосфорита, $G_{si} = g_{si} G_s$ – расход кварцита, $G_c = g_c G_s$ – расход кокса.

Анализ зависимости температуры в реакционной зоне от напряжения на электродах и дозировки кокса (рис. 2) позволяет сделать вывод о концентрации продукта реакции на выходе из реактора, об удельном расходе электроэнергии и других технологических параметрах. Очевидно, что режимом работы реактора можно управлять, воздействуя на дозировку кокса и напряжение на электродах.

Состояние восстановительной зоны определяет режим работы реактора в целом. Там выделяется основное количество тепла, там же происходит образование продуктов реакции при восстановлении исходных веществ.

Высота слоя кокса определяется скоростью его подачи в реактор и скоростью расходования в результате химической реакции. Скорость реакции в свою очередь определяется температурой реакционной зоны, площадью поверхности реакции, а также концентрацией исходного вещества. Скорость расходования кокса определяется температурой в реакционной зоне, зависящей от тепловой мощности, поэтому высота коксовой зоны уменьшается с увеличением мощности печи, определяемой напряжением на электродах (рис. 3). В случае, когда основной вклад в сопротивление реакционной зоны вносит слой кокса, электрическое сопротивление реактора определяется высотой слоя кокса.

С увеличением дозировки восстановителя толщина слоя h_{cz} увеличивается, следовательно, увеличивается сопротивление реакционной зоны, что приводит к уменьшению выделяемой мощности и, как следствие, к уменьшению температуры реакционной зоны. Температура газообразных продуктов реакции при этом тоже уменьшается.

Рассмотренная модель является оценочной. Для более сложных многомерных представлений процессов, в такого типа, агрегатах использова-

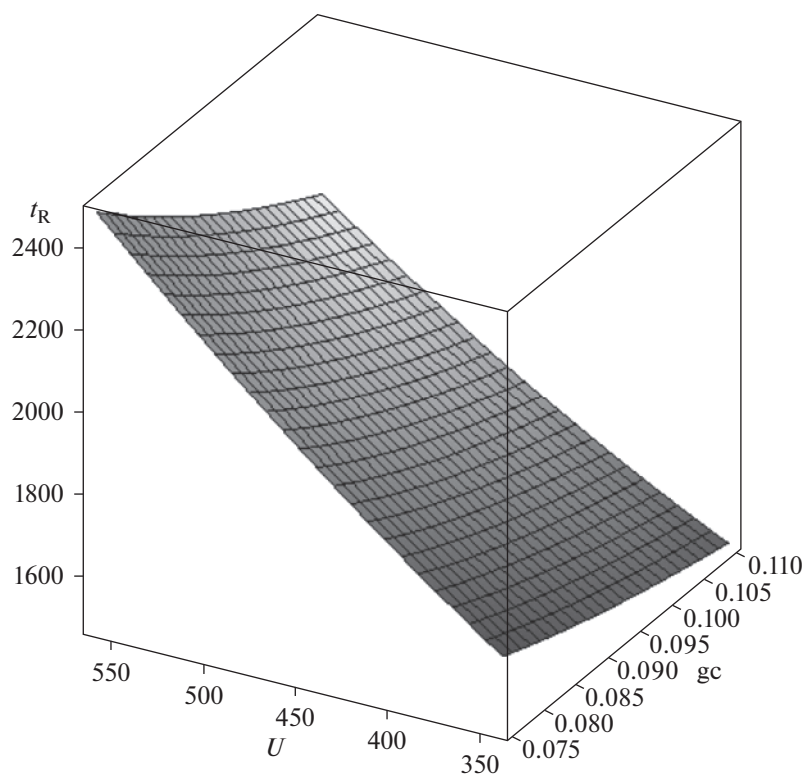


Рис. 2. Зависимость температуры реакционной зоны (К) от напряжения на электродах (В) и дозировки кокса (массовая доля).

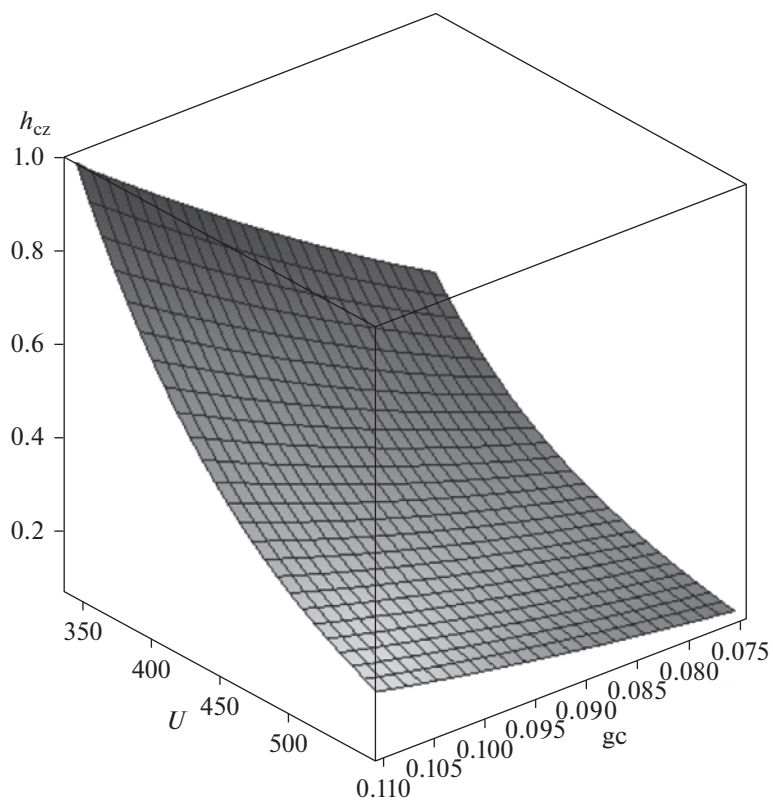


Рис. 3. Зависимость высоты слоя восстановителя (м) от напряжения на электродах (В) и дозировки кокса (массовая доля).

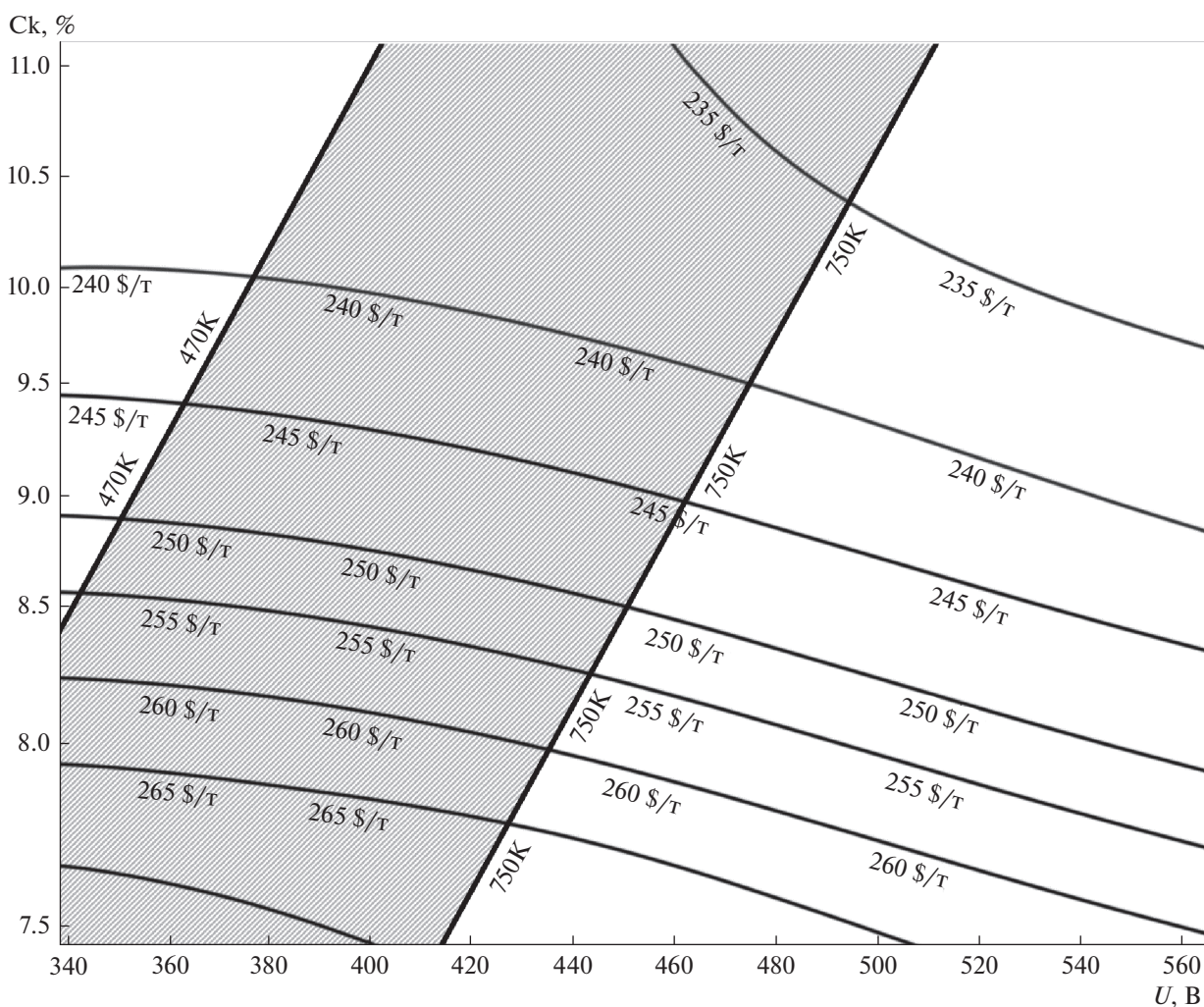


Рис. 4. Зависимость затрат на производство фосфора от напряжения на электродах и дозировки кокса.

лась двумерная модель, реализованная методом конечных элементов [26–30]. На рис. 4 представлены изолинии затрат в зависимости от управляющих переменных. Из соотношения (20) и (9) можно получить значения запыленности и уровень затрат на очистку от шлама. К сожалению, затраты на очистку от шлама экстремума не имеют и довольствоваться можно лишь предельными значениями подобно тому, как изображены пределы изменения температуры на рис. 4.

Анализ полученных соотношений позволяет практически полностью описать тепловую работу печи. Удельный расход энергии зависит от управляющих параметров – напряжения на электродах и дозировки кокса – посредством влияния на промежуточные технологические показатели, такие как температура в реакционной зоне, высота коксовой зоны, расход газа, расход шихты. При повышении напряжения на электродах удельный расход энергии снижается, такое же воздействие оказывает снижение дозировки кокса.

Таким образом, есть альтернативные воздействия управлений – это повышение напряжения, приводящее к снижению удельного расхода энергии, росту производительности, повышению степени полезного использования сырья и возрастанию нежелательных показателей, таких как температура печных газов, запыленность и повышение дозировки кокса, позволяющее снизить температуру газов под сводом, запыленность, содержание пятиоксида фосфора в шлаке, при этом снижается производительность и возрастает удельный расход электроэнергии в печи. Все зависимости существенно нелинейны. Особое внимание следует обратить на связь напряжения и мощности, которая определяется высотой коксовой зоны и, следовательно, зависит от режима работы печи. Размер коксовой зоны характеризует сопротивление зоны реагирования и потому становится понятным весьма сложный механизм формирования электрического режима печи. Описание работы печи в стационарных условиях позволяет получить

аналитически полную взаимосвязь управляющих и технологических параметров. Из результатов анализа основных зависимостей определяются области экономичных, надежных и ресурсосберегающих режимов функционирования печи. На основе комплексного описания процессов переноса в гетерогенных химически реагирующих системах на основе взаимодействия всех фаз разработана теория рудовосстановительных агрегатов, включающая весь спектр явлений, присущих аппаратам данного типа. Анализ зависимостей температуры в реакционной зоне от напряжения на электродах и дозировки кокса позволяет сделать вывод о концентрации фосфора на выходе из печи, о температуре газов в подсводовом пространстве, об удельном расходе электроэнергии и других технологических параметрах.

В принципе оптимальные условия могут быть найдены минимизацией функции удельного расхода с учетом ограничений по всем показателям, учитываемым, например, методом штрафных функций.

Особое внимание следует обратить на связь напряжения и мощности, которая определяется высотой коксовой зоны и, следовательно, зависит от режима работы печи. Размер коксовой зоны характеризует сопротивление зоны реагирования и потому становится понятным весьма сложный механизм формирования электрического режима печи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное выражение для образования пыли обобщает зависимость уноса капель от критерия Вебера как режимного параметра для различных типов технологических реакторов. Из зависимости (9) следует, что режим химического реагирования существенным образом сказывается на транспорте жидкой фазы из зоны реакции за счет увеличения скорости газа. Состав жидкой фазы, определяя коэффициент поверхностного натяжения, влияет на долю транспортируемой жидкости [11]. Количество газовой фазы или газосодержание зависит от режима работы реакционной зоны, т.е. выделяемой мощности, температуры, и интенсифицирует процесс образования капель.

Пылевые частицы являются центрами конденсации для возгонов и потому химический состав пыли может меняться по ходу газового тракта.

Кроме того, геометрия слоя коксовых частиц в реакционной зоне формирует условия роста газовых пузырьков и, следовательно, определяет режим уноса капель расплава. Количество газовой фазы или газосодержание зависит от режима работы реакционной зоны, т.е. выделяемой мощности, температуры, и интенсифицирует процесс образования капель.

Используя полученную зависимость, можно прогнозировать образование шлама в конденсаторах фосфорных печей и определять условия работы печи с максимальным качеством продукта.

Из рассмотренного выше ясно, что на появление шлама можно воздействовать режимными мероприятиями, и карты режимов должны включать изолинии зависимости потоков с тем, чтобы учесть снижение качества продукта при интенсивном образовании пыли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24094 и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2020-0019.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

$C_f^{P_2O_5}$	содержание пятиоксида фосфора в руде, кг/м ³
$C_l^{P_2O_5}$	концентрация пятиоксида фосфора в расплаве, кг/м ³
E	энергия активации, Дж/моль
G_c	расход кокса, кг/с
G_f	расход фосфорита, кг/с
G_g	расход газа, кг/с
G_l	расход шлама, кг/с
G_s	расход шихты, кг/с
G_{si}	расход кварцита, кг/с
G_{lk}	масса образованных в единицу времени капель жидкости, кг/с
M_{cz}	масса коксовой зоны, кг
M_k	модуль кислотности
P_{el}	мощность печи, Вт
Q_L	теплота плавления, кДж/кг
Q_R	тепловой эффект реакции восстановления, кДж/кг
R	газовая постоянная, Дж/(моль К)
T_R	температура расплава, К
S_c	поверхность коксовых частиц, м ²
S_f	поверхность частиц шихты, м ²
Z	запыленность, кг/м ³
b_{el}	удельный расход электроэнергии, Вт/кг
c_{pg}	теплоемкость газа, кДж/(кг К)
c_{pl}	теплоемкость шлама, кДж/(кг К)
c_{ps}	теплоемкость шихты, кДж/(кг К)
$\frac{dn}{d\tau}$	скорость образования капель, 1/с
d_c	диаметр коксовых частиц, м

ИНДЕКСЫ

d_{dis}	средний диаметр капель после диспергирования, м
d_t	диаметр витания, м
d_k	диаметр капли, м
g	ускорение свободного падения, м/с ²
g_i	массовые доли компонентов шихты
g_{i0}	масса капель в единице массы газа
g_t	уносимая масса капель в единице массы газа
h_{cz}	высота слоя восстановителя, м
k_0	предэкспоненциальный множитель, с ⁻¹
l_σ	постоянная Лапласа (капиллярная)
l	характерный размер системы, м
q_v	объемная мощность печи, Вт/м ³
s	дисперсия логарифмически нормального распределения
t_g^*	температура печных газов в подсводовом пространстве, К
t_L	температура плавления, К
t_R	температура расплава, К
t_s''	температура шихты на входе в реакционную зону, К
t_s'	температура шихты на входе в печь, К
γ_g	стехиометрический коэффициент
ν	кинематическая вязкость, м ² /с
δ	характерный размер системы, м
ξ_e	доля мощности используемая в реакционной зоне
λ_0	длина волны наиболее быстро растущего возмущения, м
ρ_{el}	удельное электрическое сопротивление расплава, Ом м
ρ_f	плотность материала шихты
ρ_g	плотность газа, кг/м ³
ρ_l	плотность жидкости, кг/м ³
σ	коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы, Н/м
φ	постоянная, характеризующая геометрическое подобие проводников
χ	коэффициент пропорциональности
ω_R	скорость реакции восстановления, кг/с
U_{el}	напряжение на электродах, В
Bo	критерий Бонда
Bo_l	критерий Бонда по параметру l
Lp_δ	эквивалентный критерий Лапласа
We	критерий Вебера

0	начальный
L	плавление
R	реакция
c	кокс
cz	коксовая зона
dis	диспергирование
el	электрический
f	фосфор
g	газ
i	номер
k	капля
l	жидкость
p	постоянное давление
g	газ
s	шихта
si	кварцит
t	витание
t ₀	начальный момент времени
v	объем
δ	характерный размер
σ	поверхностное натяжение

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guézennec A. G., Huber J. Ch., Patisson F. et al. Dust formation in Electric Arc Furnace: Birth of the particles // Powder Technol. 2005. V. 157. P. 2.
2. Nedar L. Dust formation in BOF converter // Steel Res. 1996. № 8. P. 320.
3. Gritzan A., Neuschütz D. Rates and mechanisms of dust generation in oxygen steelmaking // Steel Res. 2001. № 9. P. 324.
4. Доронин И.Е. Экспериментальное исследование испарения компонентов сталеплавильной пыли // Металлург. 2014. № 10. С. 37.
5. Zhang X., Guo K., Qi W., Zhang T., Liu C., Gas holdup, bubble behaviour, and mass transfer characteristics in a two-stage internal loop airlift reactor with different screens // Can. J. Chem. Eng. 2017. V. 95. № 6. P. 1202.
6. Еришов В.А., Пименов С.Д. Электротермия фосфора. СПб.: Химия, 1996.
7. Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Dli M.I., Bobkov V.I., Chernovalova M.V. Mechanism of the Intensification of a Heterogeneous Reduction Reaction with the Liberation of Gas Bubbles // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V.54. № 2. P. 304. [Мешалкин В.П., Панченко С.В., Дли М.И., Панченко Д.С. Механизм интенсификации гетерогенной реакции восстановления с выделением пузырьков газа // Теор. осн. хим. технол. 2020. Т. 54. № 2. С. 192.]
8. Связин А.Г. Механизм образования пыли при производстве стали // Сталь. 1999. № 12. С. 78.

9. *Баттизманский В.И.* Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса / Под. ред. Баттизманский В.И., Охотский В.Б. Донецк: Вища школа, 1981.
10. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1967.
11. *Mengxu Zhang, Jianli Li, Qiang Zeng, Qiqiang Mou. et al.* An Experimental Study on the Reduction Behavior of Dust Generated from Electric Arc Furnace // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. № 17. P. 3604.
12. *Сурин В.А., Назаров Ю.Н.* Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. М.: Металлургия, 1993.
13. *Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Bobkov V.I., Dli M.I.* Analysis of the Thermophysical and Chemical-Technological Properties of Mining and Processing Waste Materials // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020. V. 54. № 1. P. 157. [*Мешалкин В.П., Панченко С.В., Бобков В.И., Дли М.И.* Анализ теплофизических и химико-технологических свойств отходов горно-обогатительных комбинатов // *Теор. осн. хим. технол.* 2020. Т. 54. № 1. С. 30.]
14. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
15. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
16. *Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И.* Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977.
17. *Зайцев А.И., Бытев Д.О.* Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. М.: Химия, 1994.
18. *Ермаков В.Ф., Харламова И.Н., Вильк Ю.Н.* О процессе пылеобразования при электровозгонке фосфора из фосфатно-кремнистых пород бассейна Каратау // *Исследования в области электротермии.* Л.: Леннигипрохим, 1972. С. 49.
19. *Белов В.Н., Ермаков В.Ф., Ершов В.А.* Характеристика пылеуноса при электротермической переработке фосфоритов // *Фосфатное сырье и его термическая подготовка для электровозгонки желтого фосфора.* Л.: Леннигипрохим, 1982. С. 60.
20. *Альперович И.Г.* О прогнозе выхода шлама в производстве фосфора (методические аспекты) // *Совершенствование процессов и аппаратов производств карбида кальция, фосфора и фосфорных солей.* Л.: Леннигипрохим, 1988. С. 23.
21. *Белов В.Н., Бескин М.Д., Жихова А.Н. и др.* Испытания агломерата на промышленной фосфорной печи // *Фосфорная промышленность.* М.: Ниитэхим, 1978. № 2. С. 42.
22. *Меркер Э.Э.* Газодинамическая защита зоны продувки в сталеплавильных агрегатах. М.: Металлургия, 1994.
23. *Марков Б.Л.* Продувка мартеновской ванны. М.: Металлургия, 1987.
24. *Таубман Е.И., Горнев В.А., Мельцер В.Л. и др.* Контактные теплообменники. М.: Химия, 1987.
25. *Panchenko S.V., Dli M.I., Borisov V.V., Panchenko D.S.* Analysis of thermalphysic processes in near-electrode zone of electrothermal reactor // *Non-ferrous Met.* 2016. № 2. P. 57.
26. *Utikar R.P., Ranade V.V.* Intensifying multiphase reactions and reactors: Strategies and examples // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017. V. 5. № 5. P. 3607.
27. *Панченко С.В., Панченко Д.С.* Моделирование теплового состояния рудотермической фосфорной печи // *Проблемы рудной электротермии.* СПб.: СПбТИ, 1996. С. 12.
28. *Бурляева Е.В., Разливинская С.В., Трегубов А.В.* Разработка и применение обобщенной функциональной модели одностадийного химического производства // *Прикл. инф.* 2016. Т. 11. № 1(61). С. 64.
29. *Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Dli M.I., Panchenko D.S.* Analysis of the Thermophysical Processes and Operating Modes of Electrothermic Reactor Using a Computer Model // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2018. V. 52. № 2. P. 166. [*Мешалкин В.П., Панченко С.В., Дли М.И., Панченко Д.С.* Анализ теплофизических процессов и режимов работы электротермического реактора с использованием компьютерной модели // *Теор. осн. хим. технол.* 2018. Т. 52. № 2. С. 141.]
30. *Страхов А.Ф., Страхов О.А.* Особенности применения информационных технологий на стадиях жизненного цикла сложных технических систем // *Прикл. инф.* 2017. Т. 12. № 3(69). С. 80.
31. *Стырикович М.А., Петухов В.И., Колокольцев В.А.* Влияние плотности газовой фазы на величину капельного уноса // *Теплоэнергетика.* 1964. № 11. С. 78.
32. *Розен А.М., Голуб С.И., Давыдов И.Ф.* Об уносе влаги на малых расстояниях от зеркала испарения // *Теор. осн. хим. технол.* 1972. Т. 6. № 3. С. 57.