

Исследование тепло-технологических процессов агломерации фосфатного сырья

В. И. Бобков, М. И. Дли

Филиал ФГБОУВО «Национальный Исследовательский Университет «МЭИ» в г. Смоленске
NO@sbmpei.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты анализа влияния основных тепло-технологических факторов на агломерационный процесс фосфатного сырья, в частности режима зажигания кокса в горне агломерационной машины при постоянной температуре газов на входе в слой. По результатам расчётов зажигания агломерационного слоя оценивается формирование фронта горения кокса и время когда горение становится устойчивым, то есть, окончен процесс зажигания. Проанализированы влияние тепло-технологических параметров: начальной стадии распространения фронта реакции декарбонизации, выгорания кокса, расходование кислорода на горение на поведение системы. Представлена зависимость времени зажигания агломерационного слоя от расхода газов и температуры продуктов горения.

Ключевые слова: агломерация; кокс; диссоциация карбонатов; фосфорит; моделирование; горение

В металлургической и фосфорной промышленности одним из способов термической подготовки сырья служит окускование рудной мелочи путём спекания на конвейерных машинах ленточного типа – агломерационных машинах [1]. В фосфорной промышленности переработка сложного неоднородного сырья требует предварительной термической подготовки, так как оно должно отвечать технологическим требованиям и быть однородным по гранулометрическому составу, не иметь гигроскопической и химически связанной воды, содержать минимальное количество карбонатов, летучих, вредных примесей [2]. При агломерации фосфоритной шихты в слое одновременно протекают различные физико-химические превращения на различных высотах слоя: испарение влаги; зажигание частиц кокса; декарбонизация фосфоритов и другие химические реакции; горение кокса и плавление частиц шихты; появление аглоспека; конденсация паров влаги в нижних слоях.

Все эти процессы в большей степени зависят от условий теплообмена в слое [3]. Агломерация в слое – один из наиболее совершенных в тепловом отношении технологических процессов. При расходе топлива от 3–7% шихта доводится до размягчения и частичного оплавления с достижением температур порядка 1500°C в зоне

формирования агломерата.

Высокая эффективность теплоиспользования достигается при горении топлива внутри агломерируемого слоя с большой удельной поверхностью частиц шихты, обеспечивающей высокую интенсивность теплообмена между газом-теплоносителем и шихтой [4]. В процессе агломерации в слой подаётся воздух для горения кокса и переноса тепла от нагретых верхних слоёв шихты к нижним. Причём обмен тепловой энергией имеет регенерационный характер, то есть просасываемый через слой теплоноситель передаёт тепло от верхних слоёв к нижним [5]. Зона формирования агломерата перемещается вниз со скоростью, которая определяется условиями теплообмена и скоростью протекания физико-химических превращений.

При анализе начальной стадии теплообмена в слое необходимо оценивать скорость сушки, температуру газа и материала в этой стадии. Учитывая, что при сушке сырая часть материала имеет температуру мокрого термометра, которая меняется незначительно, можно считать температуру материала постоянной.

Проанализируем основные соотношения для описания сушки аглошихты при подаче в слой газов с температурой $t_{г0}$. Рассмотрим поверхностное испарение влаги. Примем, что газ и частицы у поверхности находятся в состоянии равновесия при температуре мокрого термометра t_m . Частицы имеют сферическую форму, равномерно смоченные и равномерно обтекаемые газами в режиме постоянной скорости испарения [20].

Тепловой баланс для газа представляется уравнением:

$$-\rho_r c_r W_r \frac{dt_r}{dy} = \alpha_v (t_r - t_m). \quad (1)$$

Граничные условия $y=0$, $t_r = t_{г0}$.

где c_r – теплоёмкость газа, α_v – объёмный коэффициент теплоотдачи, t_r – температура газа в слое, y – координата по высоте слоя, W_r – скорость газа в слое.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности, проект №13.9597.2017/БЧ

Решение уравнения (1) с указанными граничными условиями имеет вид:

$$t_r = (t_{r_0} - t_m) \exp(-by), \quad (2)$$

где $b = \alpha_v / (c_r W_r)$.

Изменение влагосодержания материала в слое также связано балансом тепла и описывается уравнением:

$$\rho_m L_u \frac{du}{d\tau} = -\alpha_v (t_r - t_m). \quad (3)$$

Начальные условия: $\tau=0, u=u_n$.

где u – влагосодержание в шихте, u_n – начальное влагосодержание шихты, L_u – теплота испарения влаги, τ – время.

Интегрирование уравнения (3) с соответствующими начальными условиями и с использованием (2) даёт соотношение:

$$u = u_n - \frac{\alpha_v}{\rho_m L_u} (t_{r_0} - t_m) \exp(-by) \tau. \quad (4)$$

Баланс по испарённой влаге даёт возможность оценить влагосодержание в газах x_w , при начальном влагосодержании газов x_{w_n} :

$$-\rho_m \frac{du}{d\tau} = \rho_r W_r \frac{dx_w}{dy}. \quad (5)$$

где ρ_m – плотность материала, ρ_r – плотность газа.

Откуда интегрированием с начальными условиями $y=0, x_w = x_{w_n}$ и с учётом (2–4) получаем равенство:

$$x_w = x_{w_n} - \frac{\alpha_v b}{\rho_r W_r L_u} (t_{r_0} - t_m) [1 - \exp(-by)].$$

При достижении верхним слоем шихты равновесного с газами влагосодержания u_p по истечении времени τ_p начинается движение высушенной зоны вниз, то есть начинает двигаться фронт испарения. Промежуток времени τ_p вычисляется из (4) при условиях: $y=0, \tau = \tau_p, u = u_p$,

$$\tau_p = ((u_n - u_p)(t_{r_0} - t_m)) / (\alpha_v / (\rho_m L_u)). \quad (6)$$

Для анализа движения фронта испарения будем считать, что пока на фронте испарения шихта мгновенно прогревается от t_m до t_{r_0} , газы охлаждаются до

температуры t_{r_ξ} . Из теплового баланса на фронте испарения, получим выражение для скорости движения фронта испарения:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\alpha_v}{\rho_m L_u} (t_{r_\xi} - t_m) / \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\xi}. \quad (7)$$

Таким образом, для оценки скорости сушки следует знать температуру газа на фронте испарения t_{r_ξ} и величину $\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\xi}$.

Предлагаемая математическая модель теплообмена при агломерации позволяет в первом приближении провести анализ влияния основных факторов на агломерационный процесс. Исследование модели продемонстрируем на примере описания режима зажигания кокса в горне агломашины.

Под зажиганием подразумевают процесс прогрева шихты до температур, когда тепловыделение за счёт химических реакций будет достаточным для поддержания устойчивого горения [6]. Аглопроцесс можно условно разделить на две стадии: 1) зажигание, осуществляемое в горне агломашины; 2) спекание шихты при подаче окислителя в слой и горение коксовых частиц.

От качественного осуществления первой стадии во многом зависит дальнейшее протекание процесса агломерации. Чрезмерный прогрев шихты на стадии зажигания может привести к ухудшению газопроницаемости слоя и снижению прочности аглоспека. Температурные неравномерности по объёму горна – причина некачественного зажигания.

Процесс в горне агломашины идёт с подачей окислителя, количество которого зависит от коэффициента избытка воздуха, подаваемого в горелки и присосов. Концентрация кислорода на входе в слой оценивается из соотношения:

$$C_{O_2} = 0,21 \frac{(\alpha - 1)V_n^0 + V_{пр}}{V_r + V_{пр}},$$

где V_n^0 – теоретически необходимый для горения объём воздуха; $V_{пр}$, V_r – объём воздуха за счёт присосов и продуктов сгорания в горне агломашины, соответственно.

После горна концентрация кислорода меняется, так как в слой подаётся воздух. Температура газов, подаваемых в слой в горне без учета потерь в окружающую среду, может быть вычислена из теплового баланса для горна

$$T_{r_0} = \frac{Q_n^p + Q_{вф} + Q_{тф}}{c_r V_r}$$

Здесь Q_n^p – теплотворная способность газообразного топлива; $Q_{вф}$, $Q_{тф}$ – физическое тепло воздуха и топлива.

Проверка адекватности математической модели теплообмена показала удовлетворительное количественное и качественное описание процессов.

Анализ процессов зажигания проведен при постоянной температуре газов на входе в слой. Коэффициент теплоотдачи от газа к частицам оценивался по формулам Тимофеева. Данные по теплофизическим свойствам фосфоритов принимались не зависящими от температуры.

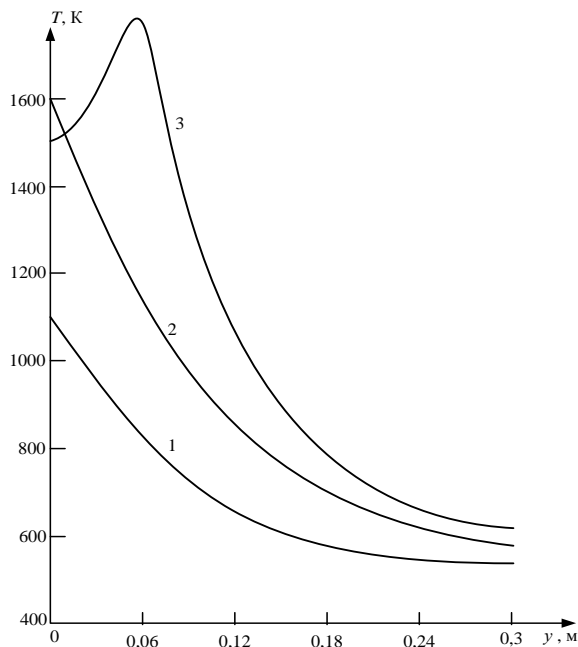


Рис. 1. Распределение температуры аглошихты в режиме зажигания. 1 – $\tau=90$ с, 2 – $\tau=120$ с, 3 – $\tau=170$ с

По результатам расчётов зажигания, рис. 1, формирование фронта горения кокса происходит на глубине 0,06м. В этом случае горение становится устойчивым, то есть окончен процесс зажигания. Таким образом, при зажигании необходим прогрев верхнего слоя шихты с конечной толщиной, что совпадает с практическими результатами.

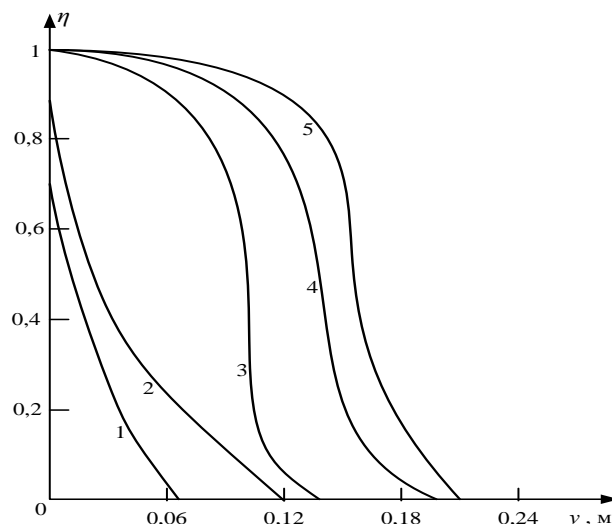


Рис. 2. Распределение концентрации карбонатов в режиме зажигания аглослоя. 1 – $\tau=90$ с, 2 – $\tau=120$ с, 3 – $\tau=150$ с, 4 – $\tau=170$ с, 5 – $\tau=190$ с

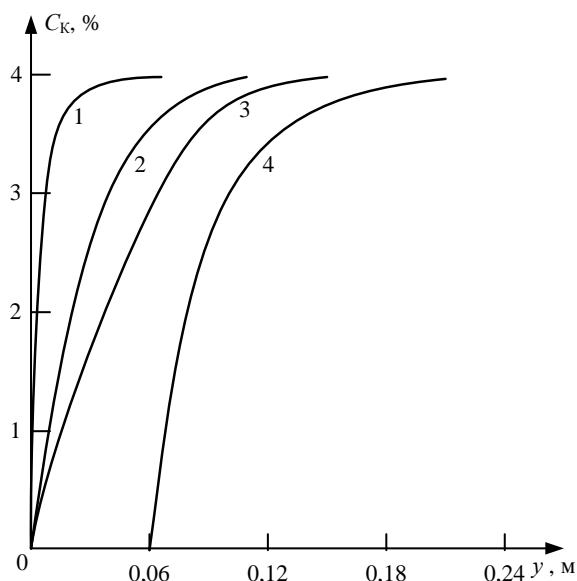


Рис. 3. Распределение концентрации кокса в режиме зажигания аглослоя. 1 – $\tau=90$ с, 2 – $\tau=120$ с, 3 – $\tau=150$ с, 4 – $\tau=170$ с

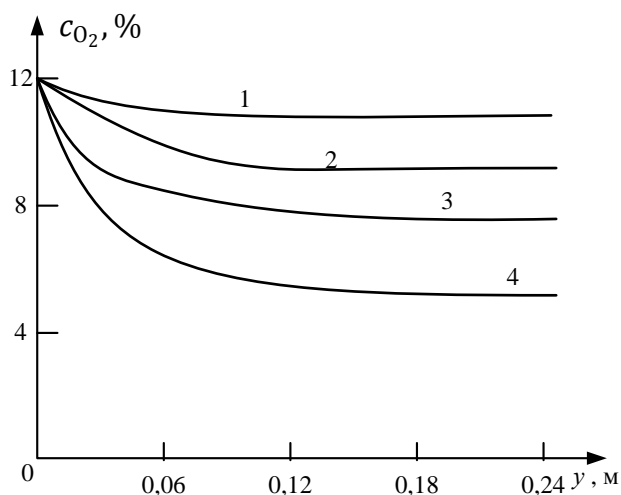


Рис. 4. Распределение концентрации кислорода в режиме зажигания агглюля. 1 – $\tau=90$ с, 2 – $\tau=120$ с, 3 – $\tau=150$ с, 4 – $\tau=170$ с

Процесс удаления влаги и диссоциации карбонатов протекает почти одновременно с горением кокса и захватывает сравнительно узкую область по высоте слоя. Начальная стадия распространения фронта реакции декарбонизации хорошо прослеживается на рис. 2. При этом на начальной стадии осуществляется выгорание кокса, рис. 3, и расходование кислорода на горение, рис. 4. Модель обеспечивает качественные зависимости тепловых параметров процесса и позволяет проанализировать влияние заданного параметра на поведение системы.

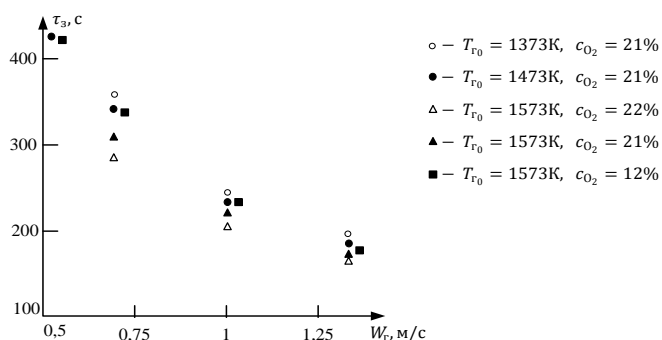


Рис. 5. Время зажигания в различных режимах подачи газа в слой шихты

В частности, зависимость времени зажигания от расхода газов (нормальной скорости подачи газов в слой) и температуры продуктов горения представлена на рис. 5. На интенсивность тепловых процессов в слое влияет не только температура газов, но и скорость прососа газов, при увеличении которой энергообмен между шихтой и газами увеличивается [7]. Это дает основание полагать, что, увеличивая скорость подачи газов на начальном этапе зажигания, можно добиться более надежного воспламенения и на основе интенсификации прогрева шихты сократить затраты тепла в горне агломашины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мешалкин В.П., Бобков В.И. Ресурсосберегающие энергоэффективные технологии обработки фосфатного сырья. В книге: XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Тезисы докладов в 5 томах. Уральское отделение Российской академии наук. Екатеринбург, 2016. 299 с.
- [2] S. Elgharbi, K. Horchani-Naifer, M. Férid, Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, vol. 119, № 1, 265-271.
- [3] Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Study of the Thermal Characteristics of Phosphate Raw Materials in the Annealing Temperature Range, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017. V. 51. № 3. pp. 307-312.
- [4] Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Intensive technologies for drying a lump material in a dense bed, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017. T. 51. № 1. C. 70-75.
- [5] V.P. Meshalkin, S.V. Panchenko, D.S. Panchenko, V.V. Men'shikov, A.S. Kazak Computer-aided simulation of heat- and mass-transfer processes in an ore-reduction electrothermal reactor, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2015, Vol. 49 (5), 606-611.
- [6] P. Luis, B. van der Bruggen, Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2014, Vol. 89, № 9, 1288-1303.
- [7] L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, S.I. Bukhhalo, O.P. Arsenyeva, O.Yu. Perevertaylenko, V.P. Meshalkin, Energy efficiency of complex technologies of phosphogypsum conversion, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2013, Vol. 47 (3), 225-230.