УДК 519.711.3, 004.942, 669.711

О.В.ТИТОВ, *аспирант*, *oleg--titov@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

O.V.TITOV, *post-graduate student*, *oleg--titov@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОАНИЕ ОБЖИГА ИЗВЕСТКОВО-НЕФЕЛИНОВОЙ И ЦЕМЕНТНОЙ ШИХТЫ В ТРУБЧАТЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

Статья посвящена разработке математических моделей процессов спекания известково-нефелиновой и обжига цементной шихты в трубчатых вращающихся печах с учетом цепных завес. Цепные завесы устанавливаются во вращающихся печах для интенсификации процессов теплообмена между обжигаемым материалом и газовым потоком, сушки материала и для лучшего пылеулавливания. Рассмотрено влияние цепных завес на процессы теплообмена и пылеулавливания. Приведены уравнения, позволяющие описать эти процессы в математической модели трубчатой вращающейся печи. Полученная математическая модель процессов спекания и обжига реализована в программном комплексе ReactOp.

***Ключевые слова*:** математическая модель; шихта; трубчатая печь; цепная завеса.

MATHEMATICAL MODELLING OF ROASTNG OF CALC-NEPHELINE AND CEMENT MIXTURE IN TUBULAR ROTARY KILNS

The article is devoted to developing a mathematical models of the sintering processes of calc-nepheline and firing the cement mixture in a tubular rotary kilns based chain curtains. Chain curtains are installed in a rotary kilns for the intensification of heat exchange between the material and burn the gas flow, drying material, dust and carbon capture. The influence of chain curtains on the processes of heat transfer and dust separation are investigated. The developed equations allow to describe these processes in a mathematical model of a tubular rotary kiln. The resulting mathematical model of sintering and firing is implemented in software package ReactOp.

***Key words*:** mathematical model, furnace feed, tubular rotary kiln, chain curtains.

Отличительной характеристикой таких процессов как спекание глиноземной и обжиг цементной шихты в трубчатых печах являются высокие температуры обжига, значительное время пребывания шихты в аппарате и высокие скорости движения газовой фазы в печи [3, 4]. В процессах спекания и обжига происходит изменение химического состава реагирующих фаз и значительное увеличение объема газовой фазы. Протекающие в печах спекания и обжига процессы являются, в основном эндотермическими и требуют подвода большого количества тепла. Основными эндотермическими процессами, происходящими в печи при вводе в нее шихты в процессах спекания и обжига при производстве глинозема, и цементного клинкера являются процессы декарбонизации, при которых происходит разложение карбонатов кальция и магния, а также процессы сушки и дегидратации кристаллогидратов. Для определения оптимальных условий проведения таких процессов необходима математическая модель ос-

новных физико-химических превращений. Наличие такой модели позволит описать количественно весь ход физико-химических превращений по длине аппарата, определить оптимальные условия для отдельных стадий процесса и разработать оптимальную технологическую схему и систему автоматизации для поддержания выбранного оптимального режима.

Основными теплообменными элементами трубчатых печей являются цепные завесы [1, 2].

Цепные завесы обычно устанавливают в загрузочной части печи, где температура газов не превышает 550 К (рис.1). В начале загрузочной части печи, где поступающая в печь шихта текучая, она налипает на поверхность теплообменных устройств и непосредственно соприкасается с горячими газами. По мере сушки шихта постепенно теряет способность налипать на элементы теплообменных устройств, которые в этом случае выполняют функции регенераторов, воспринимая тепло от газов и передавая его материалу. В районе расположения теплообменных устройств продвижение материала вдоль корпуса печи замедляется, вследствие чего повышается заполнение печи материалом, а также увеличивается поверхность теплообмена. В то же время улучшается перемешивание материала, в результате чего выравнивается его температура по сечению печи, увеличиваются разности и перепад температур между газами и обрабатываемым материалом, материалом и поверхностью теплообменников, что также способствует интенсификации теплообмена. Цепная завеса положительно влияет не только на теплообмен материала с горячими газами, но и на образование пыли и ее улавливание.

Величина конвективного теплообмена в зоне цепных завес описывается уравнением:

$$Q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}} K_F \Delta t \,, \qquad (1)$$

где $Q_{\text{кон}}$ – конвективный теплообмен кДж/(м^2·с·К); $\alpha_{\text{кон}}$ –коэффициент конвективного теплообмена, кДж/(м^2·с·К); K_F – коэффициент плотности навески, %; Δt – разность температур, К.

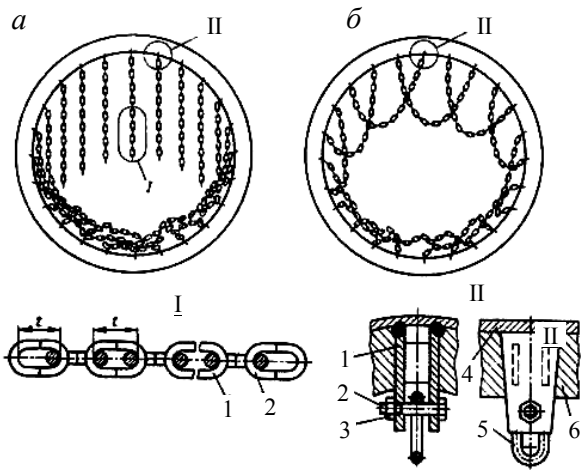


Рис.1. Цепные завесы вращающихся печей:

а – конструкция части цепной завесы (1 – рядовое звено; 2 – концевое звено); *б* – узел крепления цепей к корпусу печи (1 – кронштейн; 2, 3 – болт с гайкой; 4 – корпус печи; 5 – концевое звено цепи; 6 – футеровка)

В соответствии с уравнением (1), конвективный теплообмен ($Q_{\text{кон}}$) должен увеличиваться при росте K_F, но в связи с тем, что при этом уменьшаются скорость и поток газа через цепи, то снижается коэффициент $\alpha_{\text{кон}}$, что приводит к уменьшению $Q_{\text{кон}}$. На участке пластичного материала при высоких K_F и $m_{\text{М}} / m_{\text{ц}}$ может произойти полное перекрытие цепного сечения и тогда $Q_{\text{кон}} \approx 0$.

Скорость газового потока оказывает значительное влияние на пылеунос из печи, который пропорционален скорости газа в 3-4 степени. Это приводит к значительному увеличению пылеуноса при росте скорости газа в пространстве над материалом.

В горячей части цепной завесы увеличение слоя материала в подцепном пространстве приводит к увеличению регенеративного теплообмена, но наряду с этим увеличивается и пылевынос за счет возрастания скорости газа. Поэтому в горячей части цепной зоны нельзя допускать чрезмерного увеличения слоя материала, необходимо перераспределение скорости в цепях и подцепном пространстве за счет снижения плотности навески. Для расчета основных параметров завесы со свободно висящими цепями рассчитывается максимально возможная длина цепи [1]:

$$L_{ц} = \pi D_{П} / n \,, \qquad (2)$$

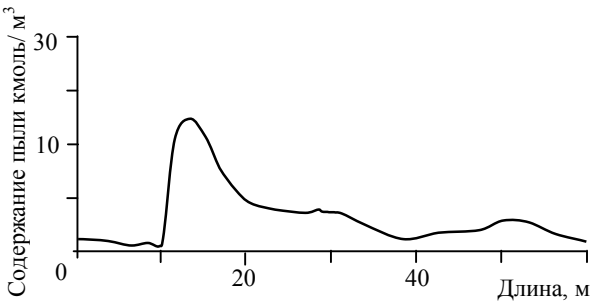


Рис.2 Изменение содержания пыли по длине печи при спекании глиноземной шихты

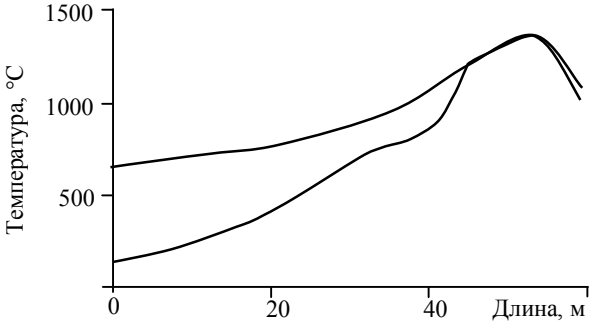


Рис.3. Температурные профили газовой и твердой фазы при спекании глиноземной шихты с учетом цепной завесы

где $D_П$ – диаметр печи, м; n – число винтовых линий навески.

Общая поверхность цепей на участке длиной $L_{уч}$

$$S_{общ} = naL_{уч}L_{ц}S_{1ПП} /(h\sin(90-\beta)), \quad (3)$$

где a – количество цепей, навешиваемых на один крепеж; $L_{уч}$, – длина участка, м, $S_{1ПМ}$ – поверхность 1 м цепи, м^2; h – шаг навески, м; β – угол наклона винтовой линии, град.

Поверхностный коэффициент плотности навески K_F рассчитывается как отношение площади поверхности цепей $S_{общ}$ к площади поверхности корпуса на этом участке (м^2/м^2):

$$K_F = S_{общ} /(\pi D_П L_{уч}), \quad (4)$$

где $S_{общ}$ – общая поверхность цепей на рассматриваемом участке, м^2; $D_П$ – диаметр печи, м; $L_{уч}$ – длина участка навески цепей, м.

Объемный коэффициент плотности навески K_V, рассчитывается как отношение площади поверхности цепей $S_{общ}$ к объему участка, на котором они навешены, м^2/м^3,

$$K_V = S_{общ} /(\pi {D_П}^2 L_{уч})/4. \quad (5)$$

С учетом принятых допущений и закономерностей, описывающих процессы теплообмена и пылеуноса в присутствии цепных завес, математическая модель, описывающая изменение концентраций компонентов твердой и газовой фаз, будет иметь вид

$$\frac{dc_i}{dl} = \frac{1}{u_s}\sum_{j=1}^{M} w_{i,j};$$

$$\frac{dT_s}{dl} = \frac{1}{u_s}\sum_{j=1}^{M} w_{i,j}Q_j - B_x(T_s - T_o) \pm$$
$$\pm K_{iF}(T_s - T_g) \pm K_{сер}(T_s - T_g);$$

$$\frac{dT_g}{dl} = \frac{1}{u_g}K_{iF}\left(T_s - T_g\right) \pm K_{сер}(T_S - T_g); \quad (6)$$

$$\frac{dc_{gaspili}}{dl} = Gs\frac{z+z'}{100};$$

$K_{iF} = K_{сер}$, если $x \le l_{сер}$ K_{iF}, если $x \ge l_{сер}$,

где l – длина печи, м; c_i – концентрация i-го компонента, кмоль/м^3; u_s – скорость материала, м/с; w_{ij} – скорость изменения концентрации i-го компонента в j-ой реакции, кмоль/(м^3·с); T_g и T_s – соответственно температуры газовой и твердой фазы, К; z' – количество пыли, циркулирующее в печи, %; G_S – расход твердого материала в слое, кг/кг.

Для программной реализации разработанной математической модели был использовании программный комплекс ReactOp [5] и система реакций, происходящих при получении компонентов клинкера и спекании шихты для производства глинозема [6].

Результаты моделирования процессов спекания глиноземной шихты и цементной шихты с учетом всех приведенных соотношений по теплообмену и пылеуносу представлены на рис.2, 3.

Выводы

1. Созданная математическая модель с учетом цепной завесы, позволяет прогнозировать состав конечного продукта спекания в зависимости от минералогического состава исходной шихты и условий работы печи.

2. Разработанная математическая модель позволяет отследить изменение составов и температурные профили твердой и газовой фаз по длине печи, выявить наиболее энергоемкие зоны печи, их смещение в зависимости от состава исходной шихты, прогнозировать точное количество тепловой энергии, необходимой для получения качественного спека из шихт различного состава.

3. На основе разработанной математической модели процесса спекания может быть определен оптимальный температурный профиль, обеспечивающий заданный конечный состав шихты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борисов И.Н.* Некоторые особенности поведения шламов на цепях при высушивании / И.Н.Борисов, Л.С.Дурнева // Цемент и его применение. 2002. № 5. С.26-28.

2. *Борисов И.Н.* Пути повышения эффективности работы цепных завес вращающихся печей // Цемент и его применение. 2003. № 3. С. 17-20.

3. *Сизяков В.М.* Научно-технический прогресс в производстве глинозема / В.М.Сизяков, Н.С.Шморгуненко // Цветные металлы. М., 1981. № 8. С.43-45.

4. *Сизяков В.М.* Повышение качества белитового шлама при комплексной переработке нефелинов / В.М.Сизяков, П.В.Яшунин, А.И.Алексеев // Цветная металлургия. 1980. № 13. С.24-26.

5. *Шариков Ю.В.* Моделирование процессов и объектов в металлургии / Ю.В.Шариков, И.Н.Белоглазов, А.Ю. Фирсов. СПГГИ. СПб. 2006.

6. *Шариков Ю.В.* Кинетика химических превращений при термообработке шихты в трубчатых вращающихся печах при производстве глинозема и цементного клинкера // Цветные металлы. 2011. № 4.

REFERENCES

1. *Borisov I.N.* Some features of shludge behavior on chains at drying / *I*.N.Borisov, L.S.Durneva // Cement and its applying. 2002. № 5. P. 26-28.

2. *Borisov I.N.* Direction of effectivitis increasing of operabilitis chain curtains of rotary kilns / Cement and its applying. 2002. № 5. P. 17-20.

3. *Sizyakov V.M.* Scintific and technical prpogress in alumina production / Sizyakov V.M,. Shmorgunenko N.S. // Non-ferrous metals. Moscow, 1981. № 8. P.43-45.

4. *Sizyakov V.M.* Quality increasing of belite mixture at complex nepheline treatment / *V.M.Sizyakov, P.V.Yakushin, A.I.Alekseev* // Non-ferrous metallurgy. 1980. № 13. P.24-26.

5. *Sharikov Y.V.* Modelling of the processes and objects in metallurgy/ RPC SPMI. Saint-Petersburg, 2006.

6. *Sharikov Y.V.* Kinetics of the chemical transformation at thermotreatment of the furnace feed in tubular rotary kilns at production of alumina and cement clinkers / Y.V.Sharikov, O.V.Titov // Non-ferrous metals. 2011. № 4.