

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ПРОЦЕССА ОБЖИГА НА КЛИНКЕР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Рассмотрена сущность процесса обжига шихты на клинкер. Построена модель вращающейся печи в программном пакете ReactOp. Найдены зависимости основных компонентов перерабатываемой шихты по длине печи спекания и общее изменение основных массовых потоков.

The essence of process of roasting charge on clinker was considered. The model of a rotating furnace was constructed in software package ReactOp. Dependences of the basic components processed charge on length of the furnace of sintering and the general change of the basic mass streams were found.

Обжиг – завершающая технологическая операция производства клинкера. В процессе обжига из сырьевой смеси определенного химического состава получают клинкер, состоящий из четырех основных клинкерных минералов*.

Сущность процесса обжига заключается в нагреве материалов с целью изменения их состава до определенной температуры, при которой еще не происходит плавления. Другими словами, при обжиге протекают процессы между твердыми и газообразными веществами при отсутствии жидкой фазы.

В обычных условиях компоненты сырьевой смеси (известняк, глина и др.) инертны, т.е. они не вступают в реакцию один с другим. При нагревании они становятся активными и начинают проявлять реакционную способность, так как с повышением температуры энергия движущихся молекул твердых веществ становится столь значительной, что становится возможен взаимный обмен молекулами и атомами с образованием нового соединения. Образование нового вещества в результате реакции двух или нескольких твердых веществ называют реакцией в твердых фазах.

В качестве установок для получения клинкера могут быть использованы различ-

ные по своей конструкции и принципу действия тепловые агрегаты, но в основном для этой цели применяют вращающиеся печи, в которых получают примерно 95 % от общего выпуска клинкера, 3,5 % получают в шахтных печах и оставшиеся 1,5 % – в тепловых агрегатах других систем.

Наиболее важными характеристиками работы вращающейся печи являются влажность и состав шихты, разность температур между горячим газом и твердым материалом (рис.1), коэффициент избытка воздуха при сжигании топлива, давление и температура воздуха и топлива, температура и запыленность отходящих газов, разрежение в печи и

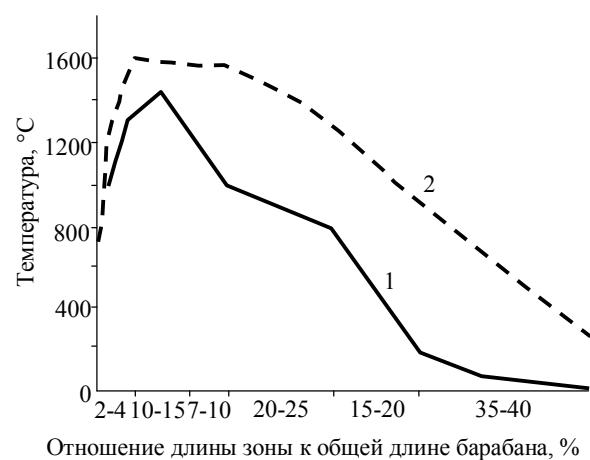


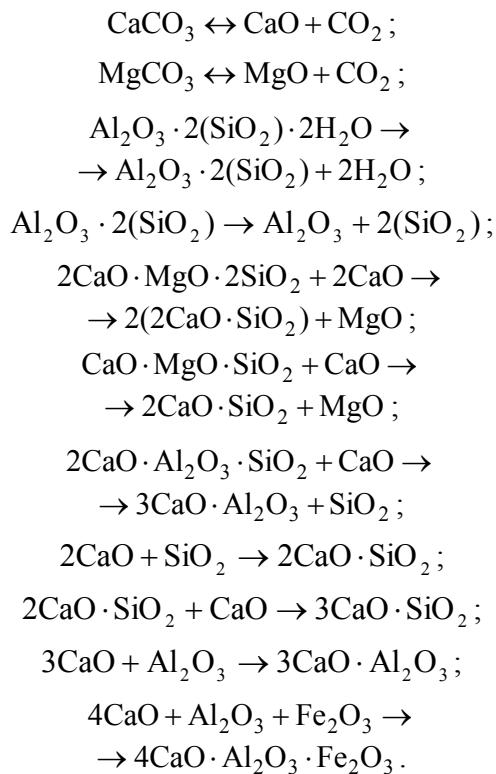
Рис.1. Температура материала (1) и газового потока (2)
по длине вращающейся печи

* Колокольников В.С. Производство цемента. М.: Высшая школа, 1967.

др. Условия спекания должны обеспечивать максимальную производительность процесса с получением спека, необходимого для дальнейшей технологической переработки качества. Режим обжига в печи и особенно в зоне спекания должен обеспечивать максимально возможную равномерность температур как во всем объеме слоя, так и отдельных кусков материала. Условиями горения и теплообмена определяются распределение температур вдоль печи, длина различных зон и оптимальные температуры в них*.

Система ReactOp Cascade позволяет составить уравнения материального баланса для печи спекания на основе модели поршневого противоточного движения фаз с учетом скорости химических реакций и переноса массы движущимися потоками фаз.

Основные реакции, проходящие в печи с образованием основных фаз клинкера, следующие:



При стационарном режиме работы печи в ней устанавливаются следующие профили температур по длине печи.

Учитывая, что в радиальном направлении происходит интенсивное перемешивание материала, обусловленное вращением печи, а продольное перемешивание можно не учитывать, будем полагать, что структура потока материала соответствует модели идеального вытеснения. При такой принятой структуре потока процесс распределен в пространстве по одной координате – по длине печи. В каждом поперечном сечении печи поток материала характеризуется тремя параметрами: расходом через сечение, концентрацией компонентов, температурой.

Принимая во внимание, что газ во вращающихся печах движется в условиях, соответствующих развитой турбулентности, когда критерий Рейнольдса $Re = (0,25 \div 1,0) \cdot 10^5$, можно принять идеальное перемешивание потока газа в радиальном направлении, ввиду того, что длина печи много больше ее диаметра, можно сказать, что структура потока газа также описывается моделью идеального вытеснения.

Поток газа характеризуется пятью переменными: расходом газа g_r ; температурой T_r ; концентрацией паров воды $\hat{E}_a^{1,2,1}$; концентрацией углекислоты $\hat{E}_a^{1,2,2}$; концентрацией кислорода $\hat{E}_a^{1,2,3}$. Газ рассматривается как четырехкомпонентная смесь (четвертым компонентом является азот).

Так как модели структуры потоков материала и газа одинаковы для всей печи, целесообразно, чтобы системы дифференциальных уравнений, составленные для различных зон печи, были приведены к единому виду с учетом соответствующих граничных условий и условий перехода от одной зоны печи к другой. При составлении уравнений для газового потока исключены члены с частными производными по времени вследствие того, что скорость движения газа на 2–3 порядка выше скорости движения материала.

Математическая модель печи спекания в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dc_i}{dx} &= \frac{1}{u_s} \sum_{j=1}^M w_{ij}; \\ \frac{dT_g}{dx} &= \frac{1}{u_s} K_{iF} (T_s - T_g), \end{aligned}$$

* Еремин Н.И. Процессы и аппараты глиноземного производства / Н.И. Еремин, А.Н.Наумчик, В.Г.Казаков. М.: Металлургия, 1980.

где x – длина печи; c_i – концентрация i -го компонента; u_s – скорость движения материала в печи; w_{ij} – скорость изменения концентрации i -го компонента в j -й реакции, T_g и T_s – соответственно температура газовой и твердой фазы.

В соответствии с общим подходом, изложенным выше, процессы, протекающие в твердой фазе, описываются уравнениями материального баланса. Уравнение материального баланса для материала имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{g_i}{v_i} \right) + \frac{\partial g_i}{\partial x} = -\gamma,$$

где v_m – скорость движения материала вдоль оси печи; γ – интенсивность переноса вещества из материала в газ; g_m – массовый расход шихты.

Уравнение материального баланса для топлива примем в виде

$$\frac{\partial g_t}{\partial x} = \tilde{A},$$

где g_t – массовый расход топлива; Γ – интенсивность выгорания топлива по длине печи, кг/(м·с).

Уравнение материального баланса для газа можно представить следующим образом:

$$\frac{\partial g_a}{\partial x} = -(\gamma + \tilde{A}),$$

где g_a – массовый расход газа.

Концентрация какого-либо компонента газа определяется из уравнения материального баланса:

$$\frac{\partial}{\partial x} (g_a K_{ai}) = -(\gamma K_{ai} + \tilde{A}_{ai}),$$

где K_{ri} – концентрация i -го компонента газа, доли единицы; K_{vi} – концентрация i -го компонента, выделяющегося из материала в газ (в нашем случае только водяной пар), доли единицы; v_i – стехиометрический коэффициент.

Температурный профиль твердой фазы, использованный при составлении модели, представлен на рис.2, а изменение массы шихты по длине вращающейся печи – на рис.3.

Сопоставление данных о составе клинкера, полученных при моделировании (в числи-

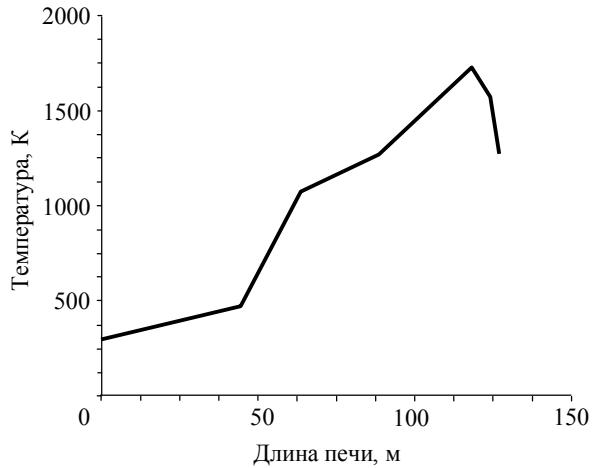


Рис.2. Профиль температуры твердой фазы по длине печи спекания

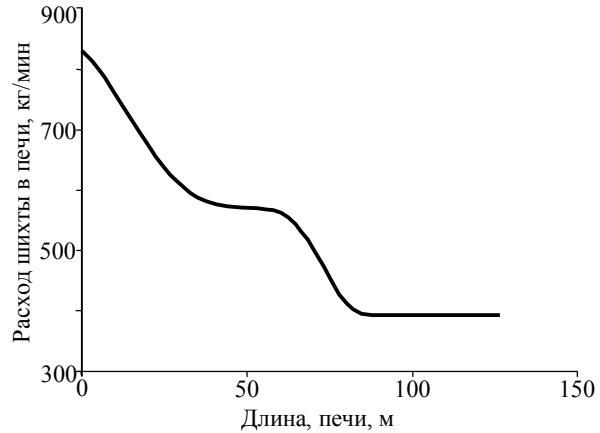


Рис.3. Материальный баланс вращающейся печи

теле) с данными работы печи обжига шихты (в знаменателе) для получения портландцемента во вращающейся печи доказывает адекватность модели и практического процесса:

Компонент клинкера	Содержание в клинкере, %
3CaO·SiO ₂	62/62,99
2CaOSiO ₂	12/12,52
3CaO·Al ₂ O ₃	7,5/7,032
3CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	12/12,30
MgO	5/5,14

Таким образом модель можно использовать для прогнозирования поведения процесса в зависимости от изменения состава исходной шихты.