

DOI 10.53364/24138614\_2021\_22\_3\_65

УДК 691.542

<sup>1</sup>Мукташев К.К., <sup>2</sup>Оспанов Е.А., <sup>3</sup>Золотов А.Д.<sup>1,2,3</sup> НАО Университет имени Шакарима города Семей, г.Семей, РК.<sup>1</sup>E-mail: [ska\\_99@mail.ru](mailto:ska_99@mail.ru)\*<sup>2</sup>E-mail: [Azol64@mail.ru](mailto:Azol64@mail.ru)<sup>3</sup>E-mail: [78oea@mail.ru](mailto:78oea@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЦЕМЕНТА

### ЦЕМЕНТ АЛУ КЕЗІНДЕ КЛИНКЕРДІ КҮЙДІРУ ПРОЦЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

### MATHEMATICAL MODELING OF THE CLINKER FIRING PROCESS IN THE PRODUCTION OF CEMENT

#### Аннотация

Математические модели процесса обжига, представленные в литературе, в основном разделяются на два направления: изучение физико-химических процессов клинкерообразования со значительным химическим уклоном, и изучение теплотехнических процессов протекающих в печах обжига. Для построения же системы регулирования процессом требуется математическая модель, содержащая в форме переменных модели измеряемые величины и управляющие воздействия, и отражающая связь между данными переменными в динамике. Имеющиеся математические модели технологического процесса обжига отражают большое количество физических параметров, которые трудно измерить или рассчитать на основе измеряемых данных. В предлагаемой статье в качестве моделей динамики процесса прокаливания клинкера в процессе приготовления цемента во вращающейся печи используют уравнение теплового баланса, описывающее изменение физико-химических свойств смеси исходных материалов в процессе прокаливания. Проведено исследование математической модели процесса обжига клинкера с использованием современных информационных технологий, а именно программы MATLAB 9 и пакета моделирования динамических систем Simulink.

**Ключевые слова:** клинкер, тепловой баланс, температура, удельная теплоемкость, система управления.

**Аңдатпа.** Әдебиетте ұсынылған атыс процесінің математикалық модельдері негізінен екі бағытқа бөлінеді: айтарлықтай химиялық бейімділігі бар клинкер түзілуінің физика-химиялық процестерін зерттеу және пештерде жүретін жылу процестерін зерттеу. Процесті басқару жүйесін құру үшін модель айнымалылары түрінде өлшенетін шамалар мен басқару әсерлерін қамтитын және динамикадағы осы айнымалылар арасындағы байланысты көрсететін математикалық модель қажет. Атыс процесінің қол жетімді математикалық модельдері өлшенетін мәліметтер негізінде өлшеу немесе есептеу қиын болатын көптеген физикалық параметрлерді көрсетеді. Ұсынылған мақалада айналмалы пеште цемент дайындау процесінде Клинкерді қыздыру процесінің динамикасының моделі ретінде қыздыру процесінде бастапқы материалдар қоспасының физика-химиялық қасиеттерінің өзгеруін сипаттайтын жылу тепе-теңдігі қолданылады. Қазіргі заманғы ақпараттық

технологияларды, атап айтқанда MATLAB 9 бағдарламасын және Simulink динамикалық жүйелерін модельдеу пакетін қолдана отырып, Клинкерді жағу процесінің математикалық моделін зерттеу жүргізілді.

**Түйін сөздер:** клинкер, жылу балансы, температура, нақты жылу сыйымдылығы, басқару жүйесі.

**Annotation.** Mathematical models of the firing process presented in the literature are mainly divided into two directions: the study of physico-chemical processes of clinker formation with a significant chemical bias, and the study of thermal processes occurring in firing furnaces. To build a process control system, a mathematical model is required that contains measured values and control actions in the form of model variables, and reflects the relationship between these variables in dynamics. The available mathematical models of the firing process reflect a large number of physical parameters that are difficult to measure or calculate based on the measured data. In the proposed article, as models of the dynamics of the clinker calcination process during the preparation of cement in a rotary kiln, the heat balance equation describing the change in the physicochemical properties of the mixture of starting materials during calcination is used. A study of a mathematical model of the clinker firing process using modern information technologies, namely the MATLAB 9 program and the Simulink dynamic systems modeling package, has been carried out.

**Keywords:** clinker, thermal balance, temperature, specific heat, control system.

В последние годы в Казахстане наблюдается значительное увеличение темпов роста строительства. Это происходит, в основном, из-за увеличивающейся потребности в жилье для выполнения программы, принятой правительством Республики Казахстан «Государственная программа жилищно-коммунального развития "Нұрлы жер" на 2020 - 2025 годы. Основной целью программы является увеличение ежегодного объема ввода жилья за счет всех источников финансирования до 20,7 млн. кв. метров к 2025 году [1]. Обеспечение эффективной финансово-хозяйственной деятельности строительных компаний зависит, в том числе, и от качества и стоимости строительных материалов, в частности цемента. Основным сырьем для производства цемента является клинкер. Главным агрегатом для обжига цементного клинкера является вращающаяся печь.

Для обоснования критериев управления процессами обжига целесообразно использовать переменные, определяемые физико - химическими параметрами составляющих смеси.

В качестве моделей динамики процесса как объекта управления могут быть использованы уравнения теплового баланса, описывающие изменения физико-химических свойств сырьевой смеси в процессе обжига.

При построении автоматизированной системы управления сложным объектом возникает задача идентификации текущего состояния параметров объекта и его математической модели с целью прогноза протекания процесса, а также синтеза управляющего устройства, которое обеспечивает заданное значение переменных объекта. В процессе обжига клинкера происходят физико-химические, механические, температурные воздействия на сырье, которые воспринимаются большим количеством контролируемых величин.

Для построения системы регулирования процессом требуется математическая модель, содержащая в форме переменных модели измеряемые величины и управляющие воздействия, и отражающая связь между данными переменными в динамике. Имеющиеся математические модели технологического процесса обжига слишком сложны и отражают большое количество физических параметров, которые трудно измерить или рассчитать на основе измеряемых данных.

Разработка предлагаемой модели включает три этапа. Первый этап - построение теоретической аналитической модели, обеспечивающей качественную сходимость с процессом. На втором этапе вводится простейший алгоритм адаптации и оценивается адекватность модели процессу. На третьем этапе на основании длительной экспериментальной проверки дрейфа параметров модели совершенствуется алгоритм адаптации. Рассмотрим печь для обжига как объект регуляции температуры агента сушки.

Изменение температуры газовой составляющей для  $i$ -ой зоны печи можно представить уравнением теплового баланса [3]:

$$c_p G_i^* T_i^g = c_p (G_i^* - G_{i-1}^*) T_{i-1}^z + P_i^G - Q_i^0 - Q_i^m, \quad (1)$$

Где,  $c_p$  - удельная теплоемкость газовой смеси,

$T_i^g, i = 1..N$  - температура газовой смеси в  $i$ -й зоне,

$$G_i^g = G_0 + G_i^G, \quad (2)$$

$G_0$  - расход воздуха в зоне горелок,

$G_i^z$  - расход подаваемого воздуха,

$G_i^G$  - расход отбираемых дымовых газов,

$N$  - Количество зон,

$$G_i^G = \frac{P_i^G}{Q_G X}, \quad (3)$$

$Q_G$  - теплота сгорания топлива,

$X$  - стехиометрическое соотношение газа и воздуха.

Левая часть уравнения (1) представляет поток тепла, переносимый через границу  $i$ -й и  $(i+1)$ -й зон, правая часть представлена следующими слагаемыми:

Первое слагаемое отображает поток тепла, переносимого горячими газами между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й зонами.

Второе слагаемое — тепловая мощность газовых горелок в данной зоне (естественно, при отсутствии в зоне горелок = 0).

Третий член правой части — тепловые потери в окружающую среду:

$$Q_i^0 = K_i^0 S_i^0 \cdot (T_i^z - T_0), \quad (4)$$

где  $T_0$  - температура наружного воздуха,

$T_i^z$  - температура горячих газов,

$S_i^0$  - суммарная площадь ограждающей поверхности,

$K_i^0$  - коэффициент теплопередачи.

Четвертое слагаемое в правой части — количество тепла, передаваемое материалу

$$Q_i^m = \frac{c_i M_i \cdot (T_i^m - T_{i-1}^m)}{\Delta t}, \quad (5)$$

где  $T_i^m$  - температура материала в  $i$ -й зоне,

$C_p$  - удельная теплоемкость материала,

$M_i$  - масса материала в  $i$ -й зоне,

$\Delta t$  - время прохождения  $i$ -й зоне.

Поле температур материала определяется классическим уравнением нестационарной теплопроводности для системы без внутренних источников тепла

$$c_q \rho_q \frac{\partial T_i^q}{\partial t} = \lambda_q \left( \frac{\partial^2 T_{i1}^q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{i1}^q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{i1}^q}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

Где  $c_q, \rho_q, \lambda_q$  - удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность материала.

В качестве начальных условий можно принять температуру материала на выходе из ( $i - 1$ )-й зоны

$$T_i^q(0) = G_{i-1}^q(\Delta t), \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \alpha_i (T_i^q - T_i^q|_{x=0, x=hx}) &= \lambda_q \frac{\partial T_i^q}{\partial x} \Big|_{x=0, x=hx}, \\ \alpha_i (T_i^q - T_i^q|_{y=0, y=hy}) &= \lambda_q \frac{\partial T_i^q}{\partial y} \Big|_{y=0, y=hy}, \\ \alpha_i (T_i^q - T_i^q|_{z=0, z=hz}) &= \lambda_q \frac{\partial T_i^q}{\partial z} \Big|_{z=0, z=hz}, \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $hx, hy, hz$  - толщина прогреваемого материала в соответствующих направлениях ( $x, y, z$ ).

Для моделирования объекта и формирования управляющих алгоритмов дифференциальные уравнения с граничными условиями преобразуются в систему алгебраических уравнений, соответствующих конечно-разностной схеме.

Для моделирования системы воспользуемся приложением SIMULINK пакета прикладного программного обеспечения MATLAB 9.

Модель, описываемая уравнением (6) с учетом граничных условий (8) представлена на рисунке 1.

