

Математические методы исследования Mathematical methods of investigation

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-11-73-79>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА КАЛЬЦИНАЦИИ ГЛИНОЗЕМА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ БАРАБАННОГО ТИПА

© Александр Леонидович Рутковский^{1*},
Зуфар Гарифуллинович Салихов², Мадина Эдуардовна Багаева¹,
Хайдарбек Алексеевич Бутов¹

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44; *e-mail: Rutkowski@mail.ru

² Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Россия, 117342, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

*Статья поступила 16 марта 2022 г. Поступила после доработки 20 мая 2022 г.
Принята к публикации 29 июня 2022 г.*

Вопросы моделирования процессов во вращающихся печах барабанного типа в установившихся (статических) режимах изучены достаточно подробно, в то время как в условиях динамики (переходных режимов) они практически не рассмотрены. Для выработки решений по управлению и оптимизации технологических режимов необходимы сведения о динамике процессов. В данной работе исследован процесс кальцинации глинозема, который является завершающей стадией в технологии его получения при всех способах производства. Качественные показатели этого процесса, проводимого во вращающихся печах барабанного типа, оказывают существенное влияние на процесс электролиза алюминия. В работе приведены результаты теоретического построения математических моделей динамики процессов тепло- и массообмена при термообработке исходного гидроксида алюминия. Построено три типа моделей при различных начальных условиях, которые с различной степенью точности описывают основные закономерности процесса. На основании теоретических данных разработана методика экспериментального исследования динамики процесса по основным каналам управления: «загрузка гидрата – температура отходящих газов», «расход природного газа – температура в зоне кальцинации» и «расход природного газа – температура отходящих газов». В результате получены передаточные функции и дифференциальные уравнения процесса по исследуемым каналам. Выполненные исследования показали хорошее соответствие структур теоретических и экспериментальных моделей. Это позволило сформулировать рекомендации по построению АСУТП кальцинации глинозема. Температура в зоне кальцинации воздействует на расход топлива (газа), так как по этому каналу объект обладает меньшим запаздыванием и большим быстродействием; эта температура определяет качество получаемого глинозема. Температуру отходящих газов необходимо поддерживать на требуемом уровне двухконтурной системой, стабилизирующей загрузку гидроксида алюминия и корректирующей температуру газов. Температура в нижней головке печи — интегральный показатель взаимодействия двух потоков: потока горящего газа и встречно движущегося потока материала. Данная температура в установившемся режиме работы печи является контрольным параметром, связанным с качеством получаемого глинозема. При управлении расходом газа необходимо также поддерживать оптимальное соотношение расходов топливо – воздух, обеспечивающее полное сжигание топлива с максимальной эффективностью.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; вращающаяся печь барабанного типа; гидроксид алюминия; глинозем; тепло- и массообмен в рабочем пространстве печи; математическая модель; динамика процесса; передаточная функция; система управления.

SIMULATION OF THE PROCESS DYNAMICS OF ALUMINA CALCINATION IN ROTATING DRUM FURNACES

© Alexander L. Rutkovsky¹, Zufar G. Salikhov²,
Madina E. Bagaeva¹, Khaidarbek A. Butov¹

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 44, ul. Nikolaeva, Vladikavkaz, North Ossetia-Alania, 362021 Russia; *e-mail: Rutkowski@mail.ru

² Institute of Control Sciences RAS, 65, Profsoyuznaya ul., Moscow, 117342, Russia.

Received March 16, 2022. Revised May 20, 2022. Accepted June 29, 2022.

The issues of modeling processes occurred in drum-type rotary kilns in steady-state (static) modes are considered in details in the literature, unlike the processes occurred in dynamic conditions (transient modes). However, management and optimization of technological regimes require gaining information about the dynamics of those processes. The goal of the study is analysis of the process of alumina calcination. The quality indicators of the process have a significant impact on the process of aluminum electrolysis. Calcination of aluminum hydroxide is a final stage in all technologies of alumina production. We present the results of theoretical construction of mathematical models of the dynamics of heat and mass transfer processes upon heat treatment of the initial aluminum hydroxide. Three types of models are constructed under different initial conditions which describe the main regularities of the process with different degree of accuracy. Proceeding from the data of the theoretical study a methodology has been developed for experimental study of the dynamics of the process along the main control channels: “hydrate loading – flue gas temperature,” “natural gas consumption – temperature in the calcination zone,” and “natural gas consumption – flue gas temperature.” Transfer functions and differential equations of the process were thus obtained for the studied channels. The revealed good agreement between the structures of theoretical and experimental models made it possible to formulate recommendations for the construction of a process control system for alumina calcination. The temperature in the calcination zone affects the fuel (gas) consumption and determines the quality of the resulting alumina. The flue gas temperature must be maintained at the desired level using a two-circuit system which stabilizes the aluminum hydroxide charge with correction for the flue gas temperature. The temperature in the lower head of the furnace is an integral indicator of the interaction of two flows: the flow of burning gas and the counter-moving flow of the material. This temperature in the steady state operation of the furnace is a control parameter associated with the quality of the resulting alumina. When managing gas consumption, it is also necessary to maintain an optimal fuel-air ratio to ensure complete fuel combustion with maximum efficiency.

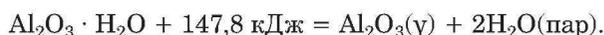
Keywords: computer simulation; drum-type rotary kiln; aluminum hydroxide; alumina; heat and mass transfer in the working zone of the kiln; mathematical model; process dynamics; transfer function; control system.

Введение

Математическое моделирование процессов для построения систем оптимального управления технологическим режимом термообработки различных материалов в последнее время все чаще применяется как в России, так и за рубежом. Вопросы моделирования процессов во вращающихся печах барабанного типа рассмотрены лишь в установившихся (статических) режимах [1 – 7], в то время как в условиях динамики (переходных режимов) они не исследованы. Однако для выработки решений по управлению и оптимизации технологических режимов необходимы сведения о динамике процессов [8]. Одним из таких процессов является кальцинация глинозема, качественные показатели которой оказывают существенное влияние на процесс электролиза алюминия.

Кальцинация гидроксида алюминия — завершающая стадия в технологии получения глинозема при всех способах его производства. Процесс кальцинации проводят во вращающихся печах барабанного типа, которые отапливаются природным газом. Данное топливо обеспечивает достаточную чистоту прокаливаемого материала, так как оно практически не содержит минеральных примесей. Режим движения газового потока и материала — противоточный. Через загрузоч-

ную головку в печь подают гидрат окиси алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$. Задача процесса кальцинации заключается в удалении внешней и гидратной влаги и получении негигроскопичного глинозема. Удаление внешней влаги происходит при температуре 100 – 105 °С. Гидратную влагу удаляют в два этапа [9]: при 225 °С из гидроокиси удаляют две молекулы воды и она превращается в бемит Al_2O_3 ; при температуре 600 °С удаляют третью молекулу воды и образуется Al_2O_3 (γ -глинозем), который характеризуется высокой гигроскопичностью. Реакции удаления гидратной влаги можно представить в следующем виде:



В интервале температур 950 – 1200 °С Al_2O_3 (γ) превращается в модификацию Al_2O_3 (α), которая является негигроскопичной. Потому максимальная температура глинозема в печи — 1200 °С. При достижении этой температуры только часть глинозема (15 – 20 %) превращается в Al_2O_3 (α) и это уже обеспечивает его негигроскопичность. Поскольку такое количество Al_2O_3 (α) рационально для завершающей стадии производства алюминия — электролиза, при получении металлургического глинозема необходимо

обеспечить работу печей кальцинации таким образом, чтобы полученный глинозем содержал 15 – 20 % Al_2O_3 (α) и 85 – 75 % Al_2O_3 (γ).

Методы исследования

Для изучения динамики процессов, протекающих в барабанной печи кальцинации глинозема, использовали инструментарий моделирования переходных режимов в объектах с распределенными параметрами.

Входным параметром объекта является производительность по питанию $Q(t)$, m^3/c , измеряемыми параметрами на выходе — температуры $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$, °C, измеряемые в двух точках по длине печи (рис. 1). Требуется найти математические зависимости, связывающие эти величины.

Выделим вдоль длины печи x , м, малый элемент материала dx [10]. Для него баланс тепловых потоков имеет вид

$$\rho CS dx \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \rho C Q(x, t) \theta(x, t) - \rho C Q(x + dx, t) \theta + \alpha B dx [\theta_{\text{газ}}(x, t) - \theta(x, t)], \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, kg/m^3 ; C — удельная теплоемкость материала, $Dж/(кг \cdot град)$; S — площадь поперечного сечения материала, m^2 ; α — коэффициент теплоотдачи от горячего газа к материалу, $Вт/(m^2 \cdot град)$; $B dx$ — площадь контакта материала с газом, m^2 ; $\theta_{\text{газ}}(x, t)$ — температура газа в точке x в момент времени t , град.

В равенстве (1) левая часть характеризует скорость изменения температуры θ элемента материала dx . Первый член правой части — это приток тепла в элемент dx вместе с входящим потоком материала Q , второй член — отток тепла с материалом, третий член — приход тепла от газового факела по закону Ньютона.

Простой вариант управления по приведенной модели получается из равенства (1) при условии, что поток $Q(x, t) = Q_0(t)$ не зависит от x :

$$\rho CS \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + \rho C Q_0(t) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} + \alpha B \theta(x, t) = \alpha B \theta_{\text{газ}}(t). \quad (2)$$

Уравнение (2) перепишем в виде

$$a \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + a \frac{Q_0(t)}{S} \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} + \theta(x, t) = \theta_{\text{газ}}(t), \quad (3)$$

где $a = \rho CS / (\alpha B)$.

Пусть температура материала на входе в печь при $x = 0$ известна (как граничное условие):

$$\theta(0, t) = \theta_0(t). \quad (4)$$

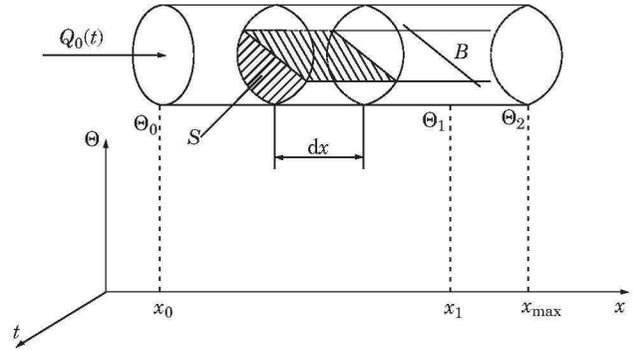


Рис. 1. Схема к получению уравнений динамики процесса кальцинации

Fig. 1. To the derivation of the equations of the dynamics of the calcination

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\theta(x, t) = e^{-t/a} \theta_0(t) \left[x - \frac{1}{S} \int_0^t Q_0(t) dt \right] + \frac{1}{\alpha} \int_0^t \theta_{\text{газ}}(t) e^{-t/a} dt, \quad (5)$$

$$0 \leq x - \frac{1}{S} \int_0^t Q_0(t) dt \leq x_{\text{max}}.$$

Это выражение определяет поведение температуры материала $\theta(x, t)$ по длине печи во времени при заданных входных и возмущающих воздействиях $Q_0(t)$, $\theta_0(t)$, $\theta_{\text{газ}}(t)$, в частности, — поведение выходных температур $\theta_1(t) = \theta(x_1, t)$ и $\theta_2(t) = \theta(x_{\text{max}}, t)$, используемых при управлении технологическим режимом процесса. Полученная модель пригодна для анализа состояния процесса при плавных изменениях загрузки печи.

Более сложными получаются модели, учитывающие зависимость потока $Q(x, t)$ от x . Такой учет требуется при быстрых изменениях загрузки печи [11]. Возможны две такие модели.

Если поток материала $Q(x, t)$ зависит от t и x , то выражение (1) примет вид:

$$\rho CS \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + \rho C \left[Q(x, t) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + \theta(x, t) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \right] + \alpha B \theta(x, t) = \alpha B \theta_{\text{газ}}(x, t). \quad (6)$$

Оно содержит две неизвестные функции — $\theta(x, t)$ и $Q(x, t)$.

Для определения $Q(x, t)$ требуется еще одно уравнение, учитывающее скорость перетекания сыпучего материала вдоль барабана вращающей-

ся печи. Самым простым является уравнение транспортной линии с чистым запаздыванием τ :

$$Q(x, t) = Q_0(t - \tau) = Q_0(t - x/v). \quad (7)$$

Система уравнений (6) и (7) — первая из упомянутых моделей, решение которой определяет выход $\theta(x, t)$, промежуточный выход $Q(x, t)$ по известным значениям входных переменных $Q_0(t)$, $\theta_0(t)$ и $\theta_{\text{газ}}(x, t)$.

Пусть, например, управляющий вход $Q_0(t)$ изменяется скачком от нуля до $b = \text{const}$ в момент времени $t_0 = 0$:

$$Q_0(t) = b\mathbf{1}(t), \quad (8)$$

где $\mathbf{1}(t)$ — единичная ступенчатая функция.

Тогда согласно (7)

$$Q(x, t) = b\mathbf{1}(t - x/v). \quad (9)$$

Подставив (9) в выражение (6), получим уравнение, содержащее только одну неизвестную функцию $\theta(x, t)$:

$$\begin{aligned} \rho CS \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho C \alpha \mathbf{1}\left(t - \frac{x}{v}\right) \frac{\partial \theta}{\partial x} - \\ - \rho C \frac{\alpha}{v} \delta\left(t - \frac{x}{v}\right) \theta + \alpha B \theta = \alpha B \theta_{\text{газ}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\delta(t - x/v)$ — δ -функция.

Решение этого уравнения позволяет найти переходную функцию объекта как реакцию на единичное ступенчатое воздействие $\mathbf{1}(t)$, т.е. $\theta_{\text{ст}}(x, t)$. Тогда, придавая величине x два фиксированных значения ($x = x_1$ и $x = x_{\text{max}}$), получим ступенчатые переходные функции для двух изменяющихся температур на выходе объекта

$$\theta_{1\text{ст}}(t) = \theta_{\text{ст}}(x_1, t) \text{ и } \theta_{2\text{ст}}(t) = \theta_{\text{ст}}(x_{\text{max}}, t).$$

В общем случае, при произвольно изменяющемся управляющем воздействии $\theta_0(t)$, уравнение этой модели имеет вид

$$\begin{aligned} \rho CS \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho C Q_0\left(t - \frac{x}{v}\right) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \\ + \rho C Q_0^*\left(t - \frac{x}{v}\right) \theta + \alpha B \theta = \alpha B \theta_{\text{газ}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$Q_0^*\left[t - \left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = \frac{dQ_0}{dt}$$

при замене $t = t - x/v$.

Оно математически относится к классу уравнений вида

$$A \frac{\partial \theta}{\partial t} + F_1(x, t) \frac{\partial \theta}{\partial x} + F_2(x, t) \theta = F_3(x, t), \quad (12)$$

где A, F_1, F_2, F_3 — известные величины.

В следующей модели взамен (7) для определения $Q(x, t)$ введем уравнение, учитывающее переменность сечения материала за счет испарения влаги, химических реакций в слое материала и других факторов. Для элемента материала запишем уравнение материального баланса

$$dx \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = Q(x, t) - Q(x + dx, t), \quad (13)$$

или в виде

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}[S(x, t)v(x, t)], \quad (14)$$

где учтено равенство

$$Q(x, t) = S(x, t)v(x, t). \quad (15)$$

Теперь выполним оценку движения слоев материала по высоте потока. В нижнем слое составляющая силы тяжести, действующая на единицу объема частиц материала вдоль потока, равна $\rho g \sin \beta$, где $\beta = \text{const}$ — угол наклона печи, g — ускорение силы тяжести. Ей противодействует сила кулонова трения $F_{\text{кул}} = \text{const}$, а также сила вязкого трения, пропорциональная скорости движения, $F_{\text{тр}} = -k_{\text{тр}}v_{\text{н}}$.

Баланс сил $\rho g \sin \beta - F_{\text{кул}} - k_{\text{тр}}v_{\text{н}} = 0$ дает величину скорости нижнего слоя

$$v_{\text{н}} = \frac{\rho g \sin \beta - F_{\text{кул}}}{k_{\text{тр}}} = \text{const} \quad (16)$$

(силой инерции пренебрегаем).

Скорость же верхнего слоя $v_{\text{в}}$ не постоянна. Составляющая силы тяжести вдоль поверхности слоя, наклоненного под углом $\beta_{\text{в}}$, равна

$$\rho g \sin \beta_{\text{в}} \approx \rho g \beta_{\text{в}} = \rho g \frac{\partial S(x, t)}{\partial x}. \quad (17)$$

Ей противодействуют те же силы, что и в нижнем слое. Баланс сил

$$-\rho g \frac{\partial S}{\partial x} - F_{\text{кул}} - k_{\text{тр}}v_{\text{в}} = 0$$

дает

$$v_{\text{в}} = \frac{1}{k_{\text{тр}}} \left(-\rho g \frac{\partial S}{\partial x} - F_{\text{кул}} \right). \quad (18)$$

Среднюю скорость потока определим следующим образом:

$$v(x, t) = \frac{1}{2}(v_n + v_b) = -\frac{\rho g}{2k_{тр}} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\rho g}{2k_{тр}} \sin \beta - \frac{F_{кул}}{k_{тр}} = K_1 - K_2 \frac{\partial S(x, t)}{\partial x}, \quad (19)$$

где

$$K_1 = \frac{\rho g}{2k_{тр}} \sin \beta - \frac{F_{кул}}{k_{тр}} = \text{const} > 0;$$

$$K_2 \frac{\rho g}{2k_{тр}} = \text{const} > 0$$

постоянные коэффициенты.

Имеем уравнения (14), (15) и (19), содержащие три неизвестные функции — $Q(x, t)$, $v(x, t)$ и $S(x, t)$. Исключая функции v и S , получим одно уравнение, определяющее $Q(x, t)$. Оно заменит уравнение (7) предыдущей модели.

Для приближенного исключения S и v про дифференцируем по t равенство $Q = S \left(K_1 - K_2 \frac{\partial S(x, t)}{\partial x} \right)$. Величиной $\frac{\partial S}{\partial t} \frac{\partial S}{\partial x}$ второго порядка малости пренебрегаем. Используя равенства

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} \text{ и } \frac{\partial S}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2},$$

получим

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = K_2 S_0 \frac{\partial^2 Q(x, t)}{\partial x^2} - K_1 \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x}, \quad (20)$$

где $S_0 = \text{const}$ — среднее сечение потока материала.

Выражение (20) есть уравнение типа Фоккера – Планка. Оно определяет $Q(x, t)$ при известных K_1, K_2, S_0 и краевых условиях [12, 13].

Таким образом, система уравнений (6) и (20), или более точно — система нелинейных уравнений (6), (14), (15) и (19) представляет собой математическую модель процессов тепло- и массообмена во вращающейся печи барабанного типа кальцинации глинозема.

Обсуждение результатов

На основании теоретических данных разработана методика экспериментального исследования динамики процесса кальцинации глинозема в печах барабанного типа. Определены динамические характеристики печи кальцинации глинозема по основным каналам управления: «загрузка гидрата ($Q(t)$) – температура отходящих газов ($\theta_0(t)$)», «расход природного газа – температура в

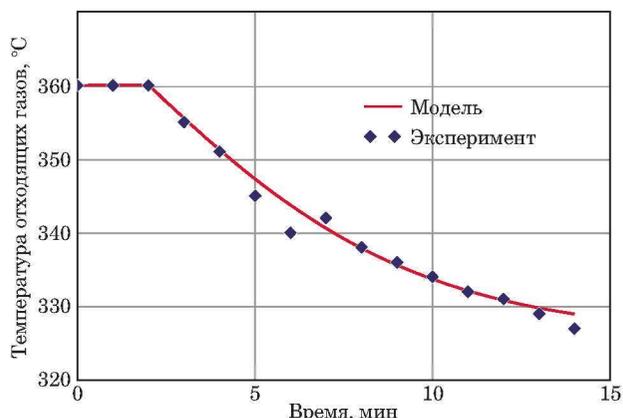


Рис. 2. Динамика процесса по каналу «загрузка гидроксида алюминия – температура отходящих газов» (входной сигнал 15%)

Fig. 2. Dynamics of the process for the channel “Aluminum hydroxide loading – flue gas temperature” (input signal 15%)

зоне кальцинации» и «расход природного газа – температура отходящих газов».

Для получения динамических характеристик процесса по каналу « $Q(t) - \theta_0(t)$ » до начала эксперимента были стабилизированы основные управляющие параметры печи: загрузка гидрата, расход природного газа и соотношение расходов «природный газ/воздух». После установления постоянного значения температуры отходящих газов загрузку гидрата увеличили на 15%. Изменение температуры фиксировали с интервалом в одну минуту до тех пор, пока она не установится на новом значении. Результаты эксперимента обрабатывали в соответствии с модифицированным методом Симою [14, 15]. Получены следующие результаты: передаточная функция

$$W_1(p) = -\frac{2,333(1 + 2,166p)e^{-2p}}{16,256p^2 + 7,253p + 1} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\%} \right], \quad (21)$$

где p — оператор Лапласа; дифференциальное уравнение

$$16,256 \frac{d^2}{dt^2} \theta_0(t) + 1,253 \frac{d}{dt} \theta_0(t) + \theta_0(t) = -2,333 \left(2,166 \frac{d}{dt} Q(t-2) + Q(t-2) \right). \quad (22)$$

С использованием интегрального преобразования

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Re}(W(j\omega)) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega, \quad (23)$$

где $\text{Re}(W_1(j\omega))$ — вещественная частотная характеристика, $j = \sqrt{-1}$, ω — частота входного сигнала

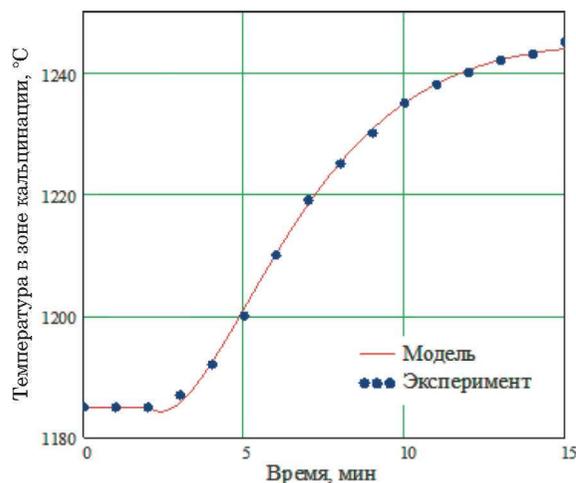


Рис. 3. Динамика процесса по каналу «расход газа – температура в зоне кальцинации» (входной сигнал 250 м³/ч)

Fig. 3. Dynamics of the process for the channel «gas consumption – temperature in the calcination zone» (input signal 250 m³/h)

ла, с помощью пакета MathCad 14 получено решение уравнения (21).

Результаты расчета приведены на рис. 2.

Аналогично получены характеристики процесса по каналу «расход топлива — температура в зоне кальцинации». Для этого после стабилизации параметров процесса на уровне рабочего режима расход газа скачком увеличили на 250 м³/час. Получены следующие характеристики: передаточная функция

$$W_2(p) = \frac{0,24(1 - 0,436p)e^{-2p}}{6,769p^2 + 4,718p + 1} \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{м}^3/\text{ч}} \right]; \quad (24)$$

дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} 6,769 \frac{d^2}{dt^2} \theta_1(t) + 4,718 \frac{d}{dt} \theta_1(t) + \theta_1(t) = \\ = 0,24 \left[F(t-2) + 4,718 \frac{d}{dt} F(t-2) \right], \end{aligned} \quad (25)$$

где $F(t)$ — расход газа (топлива), м³/час.

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Аналогично получены динамические характеристики по каналу «расход газа – температура отходящих газов». После стабилизации всех параметров расход газа скачком увеличили на 300 м³/ч. Получены следующие характеристики: передаточная функция

$$W_2(p) = \frac{0,103e^{-4p}}{3,853p^3 + 5,644p^2 + 3,32p + 1} \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{м}^3/\text{ч}} \right]; \quad (26)$$

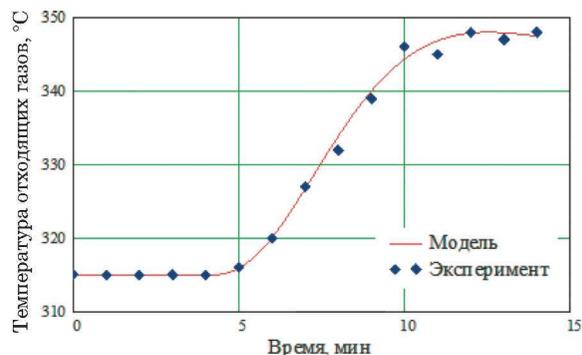


Рис. 4. динамика процесса по каналу «расход газа – температура отходящих газов» (входной сигнал 300 м³/ч)

Fig. 4. Dynamics of the process for the channel «gas flow – flue gas temperature» (input signal 300 m³/h)

дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} 3,853 \frac{d^3}{dt^3} \theta_0(t) + 5,644 \frac{d^2}{dt^2} \theta_0(t) + 3,32 \frac{d}{dt} \theta_0(t) + \\ + \theta_0(t) = 0,103F(t-4). \end{aligned} \quad (27)$$

Результаты расчета приведены на рис. 4.

Заключение

Выполненные исследования показали хорошее соответствие структур теоретических и экспериментальных моделей. Адекватность моделей подтверждена с помощью критерия Фишера, расчетное значение которого оказалась на порядок выше критической табличной величины для доверительной вероятности $\gamma = 0,99$. Рассчитаны коэффициенты корреляции между расчетными и экспериментальными данными, которые превысили значение 0,95. Следовательно, предложенные модели с достаточной степенью точности описывают реальный процесс. Это позволяет сделать вывод о том, что при построении АСУТП температурой в зоне кальцинации необходимо управлять, воздействуя на расход топлива (газа), так как по этому каналу объект обладает меньшим запаздыванием и большим быстродействием, а температура определяет качество получаемого глинозема. Температуру отходящих газов следует поддерживать на требуемом уровне двухконтурной системой, стабилизирующей загрузку гидроксида алюминия с коррекцией по температуре отходящих газов. Температура в нижней головке печи — интегральный показатель взаимодействия двух потоков: потока горящего газа и встречно движущегося потока материала [10]. Эта температура в установившемся режиме работы печи является контрольным параметром, определяющим качество получаемого глинозема. При управлении расходом газа необходимо так-

же поддерживать оптимальное соотношение расходов топливо — воздух [16], обеспечивающее полное сжигание топлива с максимальной эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. — М.: Metallurgiya, 1990. — 239 с.
2. Лапаев И. И., Половников В. Е., Константинов А. М., Белянин В. Е. Материальный баланс процесса прокаливания нефтяного кокса во вращающихся печах / Цветные металлы. 2020. № 3. С. 56 – 63. DOI: 10.17580/tsm.2020.03.08
3. Khan J. A., Pal D., Morse J. S. / Hazardous Waste and Hazardous Materials. 1993. Vol. 10(1). P. 81 – 95.
4. Leger C. B., Cundy Y. A., Sterling A. M. / Environmental Sci. Technol. 1993. Vol. 27. P. 677 – 690.
5. Jin Zhang, Aili Wang, Hengbo Yin. Preparation of graphite nanosheets in different solvents by sand milling and their enhancement on tribological properties of lithium-based grease / Chinese Journal of Chemical Engineering. 2020. Vol. 28. Issue 4. P. 1177 – 1186. DOI: 10.1016/j.cjche.2020.01.013
6. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations / Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol. 119. N 1. P. 265 – 269.
7. Tarleton S., Wakeman R. Filtration: equipment selection, modeling and process simulation. — NY: Elsevier Advanced Technology, 1999. — 437 p.
8. Салихов З. Г., Арунянц Г. Г., Рутковский А. Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами. — М.: Теплоэнергетик, 2004. — 495 с.
9. Беляев А. И. Metallurgiya legkikh metallov. Izd. 6-e, ispr. i dop. — М.: Metallurgiya, 1970. — 367 с.
10. Герасименко Т. Е., Рутковский А. Л., Чибосвили А. В. Компьютерное моделирование процессов термообработки в барабанной вращающейся печи / Изв. вузов. Цветная металлургия. 2014. № 6. С. 52 – 56.
11. Лисенко В. Г., Волков В. В., Маликов К. Ю. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. — М.: Metallurgiya, 1988. — 231 с.
12. Hannes Risken. The Fokker – Planck Equation: Methods of Solutions and Applications». 2nd edition. — Springer, 1984. — 452 p. ISBN 3-540-61530-X.
13. Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Физическая кинетика. Т. X. — М.: Наука, 1979. — 528 с.
14. Арунянц Г. Г., Рутковский А. Л., Салихов З. Г., Столбовский Д. Н. Об одном методе повышения эффективности расчета динамических характеристик объектов управления / Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 60 – 69.
15. Кравцов А. Ф., Зайцева Е. В., Чуйко Ю. Н. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов. — Киев – Донецк: Головное издательство издательского объединения «Вища школа», 1961. — 320 с.
16. Пат. 2752216 Российская Федерация. Способ оптимизации процесса факельного сжигания топлива / Рутковский А. Л., Бутов Х. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Северо-Кавказский горно-металлургический институт (госуд.

технологический ун-т). — № 2021.102793; заявл. 07.02.21; опубл. 23.07.21. Вюл. № 21.

REFERENCES

1. Arutyunov V. A., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. Mathematical modeling of thermal work of industrial furnaces. — Moscow: Metallurgiya, 1990. — 239 p. [in Russian].
2. Lapaev I. I., Polovnikov V. E., Konstantinov A. M., Belyanin V. E. Material balance of the process of calcination of petroleum coke in rotary kilns / Tsvet. Met. 2020. N 3. P. 56 – 63 [in Russian]. DOI: 10.17580/tsm.2020.03.08
3. Khan J. A., Pal D., Morse J. S. / Hazardous Waste and Hazardous Materials. 1993. Vol. 10(1). P. 81 – 95.
4. Leger C. B., Cundy Y. A., Sterling A. M. / Environmental Sci. Technol. 1993. Vol. 27. P. 677 – 690.
5. Jin Zhang, Aili Wang, Hengbo Yin. Preparation of graphite nanosheets in different solvents by sand milling and their enhancement on tribological properties of lithium-based grease / Chinese Journal of Chemical Engineering. 2020. Vol. 28. Issue 4. P. 1177 – 1186. DOI: 10.1016/j.cjche.2020.01.013
6. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations / Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2015. Vol. 119. N 1. P. 265 – 269.
7. Tarleton S., Wakeman R. Filtration: equipment selection, modeling and process simulation. — NY: Elsevier Advanced Technology, 1999. — 437 p.
8. Salikhov Z. G., Arunyants G. G., Rutkovsky A. L. Systems of optimal control of complex technological objects. — Moscow: Teploenergetik, 2004. — 495 p. [in Russian]
9. Belyaev A. I. Metallurgy of light metals. 6th edition. — Moscow: Metallurgiya, 1970. — 367 p. [in Russian]
10. Gerasimenko T. E., Rutkovsky A. L., Chiboshvili A. V. Computer simulation of heat treatment processes in a rotary drum furnace / Izv. Vuzov. Tsvet. Met. 2014. N 6. P. 56 – 52 [in Russian].
11. Lisienko V. G., Volkov V. V., Malikov K. Yu. Improvement of fuel use and heat exchange control in metallurgical furnaces. — Moscow: Metallurgiya, 1988. — 231 p. [in Russian].
12. Hannes Risken. The Fokker – Planck Equation: Methods of Solutions and Applications». 2nd edition. — Springer, 1984. — 452 p. ISBN 3-540-61530-X.
13. Lifshits E. M., Pitaevskii L. P. Physical Kinetics. Vol. X. — Moscow: Nauka, 1979. — 528 p. [in Russian]
14. Arunyants G. G., Rutkovsky A. L., Salikhov Z. G., Stolbovsky D. N. On one method for increasing the efficiency of calculating the dynamic characteristics of control objects / Avtomat. Telemekh. 2005. N 4. P. 60 – 69 [in Russian].
15. Kravtsov A. F., Zaitseva E. V., Chuiko Yu. N. Calculation of automatic control systems and regulation of metallurgical processes. — Kyiv – Donetsk: Head publishing house of the publishing association “Vishcha Shkola”, 1961. — 320 p. [in Russian].
16. RF Pat. 2752216. A method for optimizing the process of flaring fuel combustion / Rutkovsky A. L., Butov Kh. A.; owner and applicant FGBOU VO Severo-Kavkazskii gorno-metallurgicheskii institut (gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet). — N 2021102793; appl. 07.02.21; publ. 23.07.21. Byul. N 21 [in Russian].