Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 1, 1968 г.

УДК 542.47 : 661.632.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОРИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

В. В. Стальский

Процесс сушки фосфоритового концентрата во вращающемся сушильном барабане — объект автоматического управления с многообразием участвующих в процессе переменных и их сложной взаимосвязью и взаимообусловленностью. Получение математического описания подобного объекта — необходимый этап его автоматизации. Описание может представляться в виде системы дифференциальных, интегро-дифференциальных, интегральных и тому подобных уравнений или в виде передаточных функций. Составление дифференциальных уравнений аналитическим методом с использованием физических законов тепло- и массо-передачи приводит к системе уравнений в частных производных, которые не всегда практически пригодны. Кроме того, некоторые постоянные коэффициенты этих уравнений неизвестны и не могут быть определены на реальном объекте.

Попытаемся получить математическое описание объекта экспериментальными методами: активным — методом нанесения искусственных возмущений с последующим исследованием реакций объекта на эти возмущения — и статистическим.

Оъект исследования представляет собой вращающийся барабан длиною 20 *м* с внутренним диаметром 2,8 *м*. Продольная ось его наклонена на 2°,5 к горизонтальной поверхности (рис. 1). В барабан поступает фосфоритовый концентрат с влажностью 13—18% и дымовые газы от топочного устройства с температурой около 1000° С. При совместном параллельном (прямоток) движении в барабане материала, который пересыпается с помощью насадок на внутренней поверхности барабана и дымовых газов, концентрат высушивается до 0,5—2,0%. Влажность материала на выходе барабана как важнейший критерий качества концентрата и экономичности процесса сушки должна быть стабилизирована.

Основными возмущающими воздействиями процесса являются изменения количества (весового расхода) и влажности материала на входе барабана, а также изменение количества топлива, подаваемого в топочное устройство, т. е. температуры дымовых газов в барабане. Другие возмущающие воздействия (изменение гранулометрического состава материала, калорийности топлива и т. д.) носят второстепенный характер и могут рассматриваться как помехи.

Сушильный барабан условно разделяется на два последовательно соединенных объекта: «собственно» барабан (рис. 1, *а*) и его топочное устройство (рис. 1, *б*).

На топку, как объект автоматического управления, действуют следующие основные возмущения: изменение давления и расхода газа, изменение давления и расхода воздуха, подаваемого в топку для горения. Так как давление газа, расход и давление воздуха на реальном объекте стабилизированы автономными системами автоматического управления, то в первом из двух полученных объектов рассматривается только одно возмущение — расход

газа и, соответственно, один канал «вход — выход». Выходной параметр этого участка — температура в топке — является одним из возмущающих воздействий на входе собственно барабана. Кроме того, собственно в барабане рассматриваются еще два канала со входами — расход и влажность материала — и общим (для всех трех входов) выходом — влажностью концентрата.

При определении динамических характеристик объекта допущено следующее: 1) объект линейный; 2) параметры датчиков и приборов контроля входов и выходов объекта — единое целое с объектом; 3) при статистическом методе все воздействия на входах и выходах объекта — стационарные, эргодические, случайные функции времени; 4) воздействия на входах объекта не коррелированы между собой. В соответствии с этим, входные воздействия совершенно независимы и, следовательно, собственно сушильный барабан распадается по числу независимых (параллельных) каналов на три независимых объекта (рис. 1, *в*).

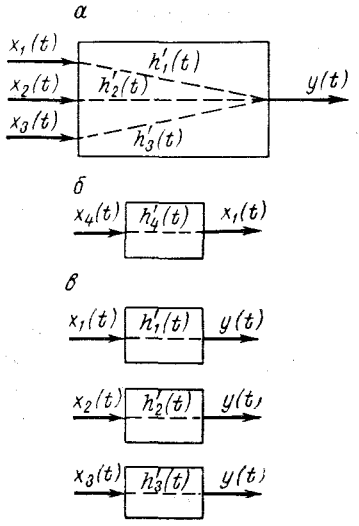


Рис. 1. Блок-схема объекта: *а*, *в* — собственно сушильный барабан; *б* — топочное устройство:

$x_1(t)$ — температура в топке; $x_2(t)$ — расход кека; $x_3(t)$ — влажность кека; $x_4(t)$ — расход топлива (газа), поступающего в топку; $y(t)$ — влажность концентрата — регулируемый параметр; $h_1'(t)$ — $h_4'(t)$ — импульсные переходные — (весовые) функции по каналам *1—4*.

Активный метод. На каждый из входов сушильного барабана наносили импульсные искусственные возмущения. Возмущения по расходу газа вводились поворотом заслонки на газопроводе с помощью ключа дистанционного управления. Для создания импульсных возмущений по расходу и влажности материала в барабан в нужный момент подавали заранее подготовленные навески. Параметры всех входов и выходов объекта регистрировали с помощью существующих и специально установленных контрольно-измерительных приборов.

Эксперименты проводили несколько раз для выбора импульсных разгонных характеристик, наиболее удачных с точки зрения условий опыта. По графикам полученных характеристик методом М. П. Симою [1957] найдены дифференциальные уравнения. Каждое из них является аппроксимацией реальных функций, описывающих объект с распределенными параметрами по тому или другому каналу вход — выход:

$$a_{mn}y^n(t) + a_{m(n-1)}y^{n-1}(t) + \ldots + a_{m1}y'(t) + a_{m0}y(t) = x_m(t); \qquad (1)$$

$$a_n x_1^n(t) + a_{n-1}x_1^{n-1}(t) + \ldots + a_1 x_1'(t) + a_0 x_1(t) = x_4(t), \qquad (2)$$

где $m = 1, 2, 3$ — каналы «вход — выход» в соответствии со схемой рис. 1.

Коэффициенты дифференциальных уравнений [Круг, Минина, 1963] вычисляются по формуле:

$$a_k = \frac{(-1)^k}{\int_0^\infty [y(t) - y(\infty)]\,dt}\left[\Delta x \frac{t_и^{k+1}}{(k+1)!} - \int_0^\infty [y(t) - y(\infty)] \sum (-1)^i a_i \frac{t^{k-i}}{(k-i)!}\,dt\right], \qquad (3)$$

где $k = 1, 2, 3, \ldots$; $i = 0, 1, 2, \ldots$; $\Delta x = x(t)_{max} - x(\infty)$ — амплитуда искусственного возмущения при прямоугольной форме импульса и отсчете координат $x(t)$ и $y(t)$ от $x(\infty)$ и $y(\infty)$ соответственно; $t_и$ — продолжительность импульса.

Однако прямоугольную форму импульсного искусственнного возмущения часто получить не удается. В рассматриваемом случае, когда выход $x_1(t)$ первого из двух последовательно соединенных объектов является входом во второй, вообще нельзя сформировать искусственное возмущение какой-либо стандартной формы. Поэтому формула (3) преобразована таким образом, чтобы можно было вычислить коэффициенты дифференциального уравнения переходного процесса при произвольной форме импульсного воздействия:

$$a_k = \frac{(-1)^k}{\int_0^\infty [y(t) - y(\infty)]\,dt} \left\{ \int_0^{t_n} [x(t) - x(\infty)] \frac{t^k}{k!} - \right.$$

$$\left. - \int_0^\infty [y(t) - y(\infty)] \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \frac{t^{k-i}}{(k-i)!}\,dt \right\}. \qquad (4)$$

При эксперименте на действующем объекте в производственных условиях оказалось, что из четырех исследуемых входов стабилизировать возмущения на время опытов возможно только на двух — по расходу газа $x_4 t$ и соответственно по температуре топки $x_1(t)$. В то же время реакции от «естественных» возмущений — произвольных изменений возмущающих воздействий по другим входам — накладываются на реакции от искусственных импульсных возмущений и искажают их.

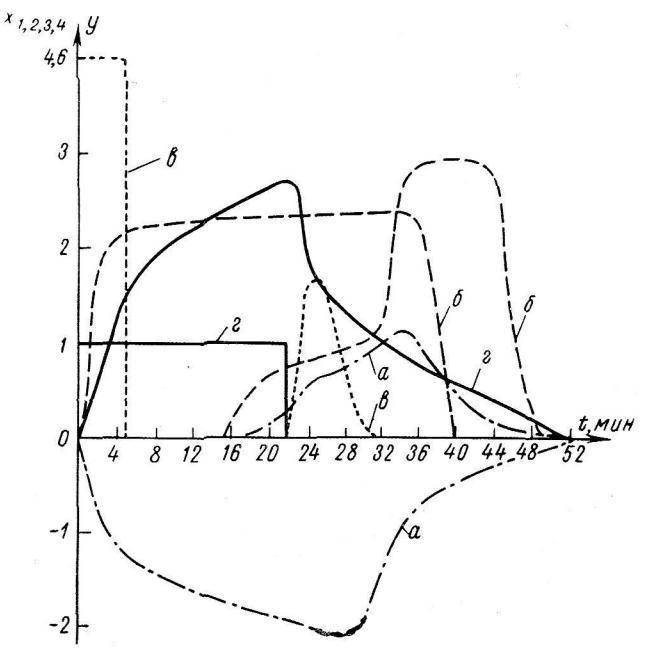


Рис. 2. Импульсные разгонные характеристики объекта и искусственные возмущения по каналам:

а — температура в топке, 10^2 °С — влажность концентрата, %; *б* — расход кека, 10 *кгс/пог. м* — влажность концентрата, %; *в* — влажность кека, % — влажность концентрата, %; *г* — расход топлива (газа), 10^3 *м³/ч* — температура в топке, 10^2 °С.

Вид импульсных разгонных характеристик и, следовательно, коэффициенты уравнений (1) уточняли методом постепенных приближений [Стальский, 1966]. Для этого по формулам (3) и (4) определили коэффициенты уравнений (1) и (2) первого приближения и решили их приближенным (численным) методом. По полученным данным были построены графики реакций объекта на естественные возмущения. Эти мешающие реакции также графически вычитали из основной импульсной разгонной характеристики — реакции на искусственное возмущение — и по найденной кривой второго приближения вновь вычисляли коэффициенты уравнения и т. д. По максимально возможным по точности приближениям получена система дифференциальных уравнений:

$$108 \cdot 10^4 y^{(8)}(t) + 45{,}7 \cdot 10^4 y^{(7)}(t) + 166 \cdot 10^3 y^{(6)}(t) +$$
$$+ 51 \cdot 10^3 y^{(5)}(t) + 2487{,}2 \cdot 10^2 y^{(4)}(t) + 2487 y^{(3)}(t) +$$
$$+ 402 y^{(2)}(t) + 43 y'(t) + 3{,}9 y(t) = x_1(t),$$

$$264 \cdot 10^2 y^{(6)} t + 126 \cdot 10^2 y^{(5)}(t) + 36{,}5 \cdot 10^2 y^{(4)}(t) +$$
$$+ 728 y^{(3)}(t) + 105 y^{(2)}(t) + 108 y'(t) + 0{,}66 y(t) = x_2(t); \qquad (6)$$
$$133 \cdot 10^2 y^{(5)}(t) + 348 \cdot 10^2 y^{(5)}(t) + 7560 y^{(4)}(t)$$
$$+ 1320 y^{(3)}(t) + 172 y^{(2)}(t) + 14{,}9 y'(t) + 0{,}65 y(t) = x_3(t);$$
$$0{,}023 x_4''(t) + 0{,}029 x_4'(t) + 0{,}003 x_4(t) = x_1(t).$$

Для примера на рис. 2 показаны «улучшенные» таким методом импульсные разгонные характеристики по каналам $x_1(t) - y(t)$, $x_2(t) - y(t)$, $x_3(t) - y(t)$ собственно барабана и по каналу $x_4(t) - x_1 t$ топочного устройства барабана.

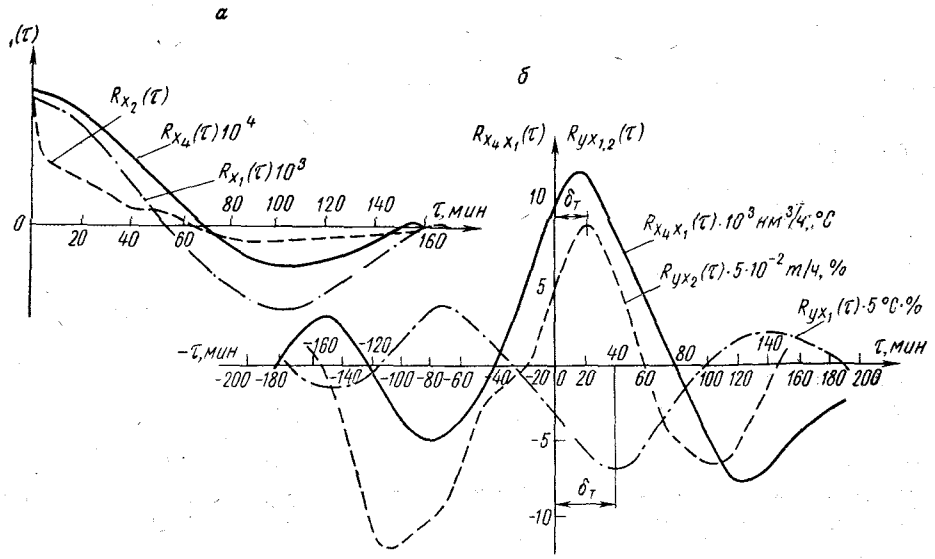


Рис. 3. Автокорреляционные (*а*) и взаимнокорреляционные (*б*) функции случайных процессов:

$R_{x_1}(\tau)$ — температура в топке, $(°C)^2$; $R_{x_2}(\tau)$ — расход кека, *т/ч*; $R_{x_4}(\tau)$ — расход топлива (газа) $(нм^3/ч)^2$; $R_{yx_1}(\tau)$ — температура в топке — влажность концентрата, °С·%; $R_{yx_2}(\tau)$ — расход кека — влажность концентрата, *т/ч*·%; $R_{x_4x_1}(\tau)$ — расход топлива (газа) — температура в топке, $нм^3/ч \cdot °C$.

Как видно из сравнения решений уравнений (5), (6) с кривыми, зарегистрированными на объекте, полученная аппроксимация дает удовлетворительное совпадение математической модели с реальным объектом.

Статистический метод. В соответствии со статистическим методом исследования любой объект автоматического управления можно описать уравнениями, связывающими корреляционные функции его входов и выходов [Солодовников, 1960].

Топочное устройство барабана описывается интегральным уравнением:

$$R_{x_1 x_4}(\tau) = \int_0^\infty h_4'(\Theta) R_{x_4}(\tau - \Theta)\, d\Theta; \qquad (7)$$

сушильный барабан — системой интегральных уравнений:

$$R_{yx_1}(\tau) = \int_0^\infty h_1'(\Theta) R_{x_1}(\tau - \Theta)\, d\Theta;$$
$$R_{yx_2}(\tau) = \int_0^\infty h_2'(\Theta) R_{x_2}(\tau - \Theta)\, d\Theta; \qquad (8)$$
$$R_{yx_3}(\tau) = \int_0^\infty h_3'(\Theta) R_{x_3}(\tau - \Theta)\, d\Theta,$$

где $R_m(\tau)$, $R_{lm}(\tau)$ — соответственно автокорреляционная и взаимнокорреляционная функции центрированного процесса; m, l — входные и соответственно выходные параметры объекта; Θ — независимая переменная.

На взаимнокорреляционных функциях расход кека — влажность концентрата, температура в топке — влажность концентрата (рис. 3) нанесены значения технологического запаздывания $\delta_т$. Эти значения хорошо совпадают со значениями, полученными технологическими методами и физическими экспериментами на реальном объекте. Однако полного совпадения $\delta_т$ со временем чистого (транспортного) запаздывания в объекте не может быть, так как значения $\delta_т$, определенные из взаимнокорреляционных функций, зависят также от постоянных времени объекта [Браун, 1966].

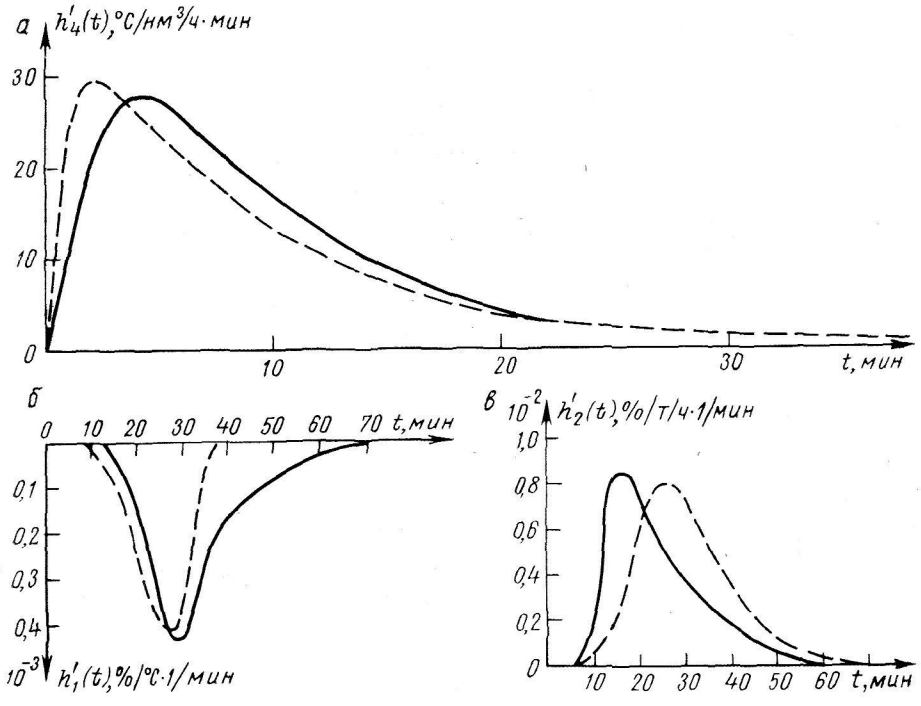


Рис. 4. Импульсные переходные функции по каналам: *а* — расход газа — температура в топке; *б*— температура в топке — влажность концентрата; *в* — расход кека — влажность концентрата.

Уравнение (7) и первые два уравнения системы (8) решались на ЭВМ «Минск-1» методом подбора [Солодовников, 1960]. Последнее уравнение системы (8) не решалось, так как из-за отсутствия автоматического контроля влажности кека и сложности лабораторных анализов для получения значений влажности, необходимые статистические характеристики процесса не были получены. Импульсные переходные функции $h'_1(t)$, $h'_2(t)$, $h'_4(t)$ воспроизводились графически по вычисленным значениям (рис. 4). При вычислении этих функций за начальный вариант при подборе принимали функции, полученные по уравнениям (5), (6) (рис. 4, пунктир).

Незначительное расхождение между соответствующими функциями показывает, что математическое описание, полученное статистическим методом, дает те же результаты. Оценить, какой из методов лучше отражает реальный объект, представляется затруднительным. Очевидно, оба метода дают приблизительно одинаковую степень приближения модели к оригиналу. Поэтому можно считать, что применение классического метода

с дополнениями — учетом мешающих возмущений — позволяет решать задачи получения динамических характеристик объекта, хотя ранее такого рода исследования проводились только статистическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

Браун В. И., Процуто В. С. Опыт экспериментального определения статистическими методами технологического запаздывания на объектах обогатительной фабрики. Цветная металлургия, № 2, 1966.

Круг Е. К., Минина О. М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. Госэнергоиздат, 1962.

Симою М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования. Автоматика и телемеханика, № 6, 1957.

Солодовников В. В., Усков А. С. Статистический анализ объектов регулирования. Машгиз, 1960.

Стальский В. В. Метод экспериментального определения динамических параметров сушильного барабана как объекта автоматического управления. Зап. ЛГИ, т. XLVI, вып. 3, 1966.