

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В БАРАБАННЫХ СУШИЛКАХ**

Основные цели системы управления процессом сушки материала в барабанной сушилке:

1. Поддержание желаемого качества высушенного продукта, независимо от возмущения в процессе сушки и колебания подачи питания.
2. Максимизация пропускной способности при оптимальной энергетической эффективности и минимуме затрат.
3. Избежание пересушки и недосушки.
4. Стабилизация процесса сушки.
5. Оптимизация производительности процесса сушки.

Для решения данных задач необходима разработка математической модели данного процесса сушки с учетом химико-технологических процессов, происходящих в нем и конструктивных особенностей барабанной сушилки.

Процессы тепло- и массообмена (влагообмена) в барабанной сушилке зависят от ее конструктивных характеристик (размеров, числа и профиля лопаток и т. д.), а также от технологических параметров (числа оборотов барабана, угла наклона аппарата, расхода, температуры и влагосодержания воздуха и материала на входе в сушилку). При определении динамических свойств данного аппарата естественно считать его конструктивные характеристики неизменными. Таким образом, в качестве возмущающих воздействий (входных величин) принимаем изменения расхода, температуры и влагосодержания материала и воздуха на входе в сушилку.

При составлении математической модели барабанной сушилки сделаем следующие допущения: [1]

1. Теплоемкости материала, влаги (воды) и барабана и коэффициенты теплоотдачи от воздуха к материалу и барабану постоянны по длине и в поперечном сечении сушилки, а также во времени.
2. Температура и влагосодержание материала распределены по длине аппарата и сосредоточены в его поперечном сечении (одномерная задача), так как при вращении барабана материал хорошо смешивается.
3. Поперечное сечение слоя материала, находящегося на лопастях барабана, значительно меньше его длины, а скорость воздуха

намного больше скорости перемещения материала вдоль сушилки. Температура и влагосодержание воздуха одинаковы по длине и в поперечном сечении слоя материала и равны температуре и влагосодержанию на выходе.

4. Передачей тепла материалу при соприкосновении его с лопастями барабана пренебрегаем.

5. Температура барабана в статике равна температуре воздуха на выходе из сушилки.

6. Передачей тепла от воздуха к материалу путем лучеиспускания пренебрегаем.

7. Движение материала по сечению аппарата происходит равномерно, без турбулентного смещения.

При составлении уравнений сохранения энергии для воздуха и материала учитываем лишь тепло, затраченное на нагрев «сухого» материала, поскольку тепло, переданное воздухом материалу и затраченное на испарение влаги из него, возвращается обратно в воздух вместе с испаренной влагой.

Структурную схему барабанной сушилки можно представить следующим образом:



На основании анализа процесса сушки как объекта управления можно определить воздействия, оказывающие влияние на данный объект:

- возмущающие воздействия: входное влагосодержание материала; расход материала; входное влагосодержание воздуха;
- регулирующие воздействия: расход теплоносителя; расход первичного воздуха; расход вторичного воздуха;
- регулируемая величина: выходное влагосодержание материала.

Для разработки математической модели процесса сушки с учетом распределённости параметров с учетом приведенных допущений составляем следующие дифференциальные уравнения:

Уравнение сохранения энергии для воздуха

$$LI_1 - LI_2 - \alpha_{f,г.м.} F_M \left( t_{2г} - \frac{t_{1м} - t_{2м}}{2} \right) - \alpha_{f,г.б.} F_6 (t_{2г} - t_6) = M_\Gamma \frac{dl_2}{d\tau} \quad (1)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в воздухе

$$L(d_1 - d_2) + G(w_1 - w_2) = M_\Gamma \frac{dd_2}{d\tau} \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии для материала

$$c_m G \frac{\partial t_m}{\partial \bar{y}} + c_m t_m \frac{\partial G}{\partial \bar{y}} - \alpha_{f,г.м.} F_M (t_{2г} - t_m) + \frac{\partial}{\partial \tau} (c_m M_m t_m) = 0 \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы для сухого материала

$$\frac{\partial G}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial M_m}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

Уравнение сохранения массы для влаги в материале

$$G \frac{\partial w}{\partial \bar{y}} + w \frac{\partial G}{\partial \bar{y}} + K F_M (w - w_{равн.}) + \frac{\partial}{\partial \tau} (M_m w) = 0 \quad (5)$$

Уравнение сохранения энергии для сушильного барабана

$$\alpha_{f,г.б.} F_6 (t_{2г} - t_6) = c_6 M_6 \frac{dt_6}{d\tau} \quad (6)$$

где  $L$  – расход теплоносителя (по абсолютно сухому веществу),  $I$  – энтальпия,  $\alpha_f$  – поверхностный коэффициент теплообмена,  $F$  – площадь,  $t$  – температура,  $M$  – количество вещества,  $d$  – влагосодержание теплоносителя,  $G$  – расход материала (по абсолютно сухому веществу),  $c$  – истинная теплоемкость,  $K$  – коэффициент сушки.

На основании данных уравнений, которых получена система нелинейных уравнений в частных производных. Проведена линеаризация данной системы и получена математическая модель процесса сушки по основным динамическим каналам.

$$\begin{aligned} a_1 \frac{d\Delta t_{2г}}{d\tau} + a_2 \Delta t_{2г} + a_3 \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_4 \mu_{2d} = \\ = a_5 \Delta t_{1г} + a_6 \Delta t_{1г} + a_6 \mu_L + a_7 \Delta t_{1м} + a_7 \Delta t_{2м} + \\ + a_8 \Delta t_6 + a_9 \mu_{1d} + a_{10} \mu_{F,м} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_{11} \frac{d\mu_{2d}}{d\tau} + a_{12} \mu_{2d} = \\ = a_{13} \mu_{1d} + a_{14} \mu_{1w} + a_{15} \mu_L - a_{14} \mu_{2w} + a_{16} \mu_G \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_{17} \frac{\partial \Delta t_m}{\partial \bar{y}} + a_{18} \frac{\partial \Delta t_m}{\partial \tau} + a_{19} \Delta t_m = \\ = a_{19} \Delta t_{2г} + a_{20} \mu_{F,м} + a_{21} \frac{\partial \mu_{M,м}}{\partial \tau} + a_{22} \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + a_{23} \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
& a_{24} \frac{\partial \mu_w}{\partial \tau} + a_{25} \frac{\partial \mu_w}{\partial \bar{y}} + a_{26} \mu_w + [a_{27} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{28}] \mu_{2d} + \\
& + [a_{29} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{30}] \Delta t_{2\Gamma} + [a_{31} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{32}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \tau} + \\
& + a_{33} \exp(-a_0 \bar{y}) \mu_L + [a_{34} \exp(-a_0 \bar{y}) + a_{35}] \frac{\partial \mu_G}{\partial \bar{y}} + [a_{36} \exp(-a_0 \bar{y}) \\
& + a_{39}] \mu_G = 0(11) \\
& a_{38} \frac{d\Delta t_6}{d\tau} + a_{39} \Delta t_6 = a_{39} \Delta t_{2\Gamma} \quad (12)
\end{aligned}$$

Однозначность решения системы уравнений (7-12) зададим краевыми условиями

При  $y = 0$   $\mu_w = \mu_{1w}$   $\Delta t_m = \Delta t_{1m}$   $\mu_G = \mu_{1G}$

При  $\tau = 0$   $\Delta t_{2\Gamma} = \mu_{2d} = \Delta t_m = \mu_G = \mu_w = \Delta t_6 = 0$

Применяя к уравнениям (7-12) преобразование Лапласа  $\varphi(p) = L[F(\tau)]$  и  $\varphi(s) = L[F(\bar{y})]$  и одно обратное преобразование  $F(y) = L^{-1}[\varphi(s)]$  можно получить передаточные функции по каналам, приведенным на структурной схеме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баумштейн И.П. Автоматизация процессов сушки в химической промышленности / И.П. Баумштейн, Ю.Н. Майзель – М.: Химия, 1970 – 232 с.

УДК 669.054

А.М. Алексеюк, магистрант;  
В.В. Сарока, доц., канд. техн. наук;  
Д.С. Карпович, доц., канд. техн. наук;  
М.Ю. Подобед, канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЦИКЛИНГА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Организация производства рециклинга металлов крайне необходима в странах с развитой инфраструктурой машиностроения, автомобилестроения, тракторостроения, приборостроения и других отраслей. К таковым относится и Республика Беларусь, в которой уровень развития промышленности требует экспорта металлов, сплавов и сопутствующих материалов. Это связано с тем, что по сравнению с производством первичного алюминия алюминиевая рециркуляция имеет существенные преимущества, которые заключаются в более низких