ристик приводит к необходимости построения более простых математических моделей в виде управляемых линий задержки. На рис. 4. приведено цифро-аналоговое устройство для воспроизведения переходных характеристик системы пневматического торможения поезда, которое состоит из регистра сдвига, запускаемого от тактового генератора с частотой $f=\frac{1}{\tau_{зап}}$, коммутатора и пассивной схемы, переходные характеристики которой определяются выражением (7). Коммутатор позволяет подключить пассивные схемы в зависимости от начала отсчета к определенным разрядам регистра сдвига, т. е. получить характер изменения тормозных сил в зависимости от места открытия тормозного крана.

Таким образом, приведенные математические модели системы пневматического торможения поезда позволяют с достаточной для практики точностью воспроизводить характер изменения тормозных сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Корсунов. Электронная модель газопровода. Тр. семинара «Математическое моделирование и теория электрических цепей», вып. 3, Киев, 1969.
2. Б. Л. Карвацкий, В. М. Казаринов. Автотормоза. «Транспорт», 1956.
3. Г. Корн, Т. Корн. Аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины. «Наука», 1968.

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ СУШИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

В. Г. Васильев, Л. Е. Тимановская, В. А. Шорох, Т. В. Макарычева

В данной статье рассматриваются вопросы упрощенного математического описания и моделирования сушильных процессов применительно к барабанной сушильной установке.

Барабанные газовые сушилки широко применяются в ряде отраслей промышленности для подсушки разнообразных материалов. Однако теория сушильного процесса, протекающего в барабанной сушилке, несмотря на широкое применение этого аппарата, до настоящего времени разработана недостаточно. Это может быть объяснено влиянием многих, трудно поддающихся учету факторов на процесс сушки. Тесно переплетающиеся явления тепло- и массообмена осложняются аэродинамическими процессами, связанными с движением сушильного газа и перемешиванием материала. Явление тепло- и массообмена в сушильном барабане описываются дифференциальными урав-

нениями в частных производных, что в значительной мере осложняет математический анализ и исследование методом электронного моделирования. Поэтому целесообразно сделать некоторые упрощающие предположения.

Для упрощения схемы процесса будем считать, что теплопередача при сушке влажных материалов в барабанной сушильной установке осуществляется, в основном, путем конвекции [1]. Для рассматриваемых материалов, которые являются грубокапиллярными и имеют значительную влажность на выходе из сушилки (6—9%), силы капиллярного всасывания достаточно велики и жидкость непрерывно подается на поверхность материала (скорость сушки определяется скоростью испарения влаги со свободной поверхности). Кроме того, многочисленные опытные данные подтверждают, что температура материала при выходе из сушилки обычно постоянна и соответствует температуре мокрого термометра. Поэтому процесс сушки в барабанных сушилках можно рассматривать как «внешнюю задачу» тепло- и массообмена между газом и поверхностью материала [2].

Для построения системы автоматического регулирования необходимо иметь математическое описание динамики процесса, отражающее его физический характер хотя бы в грубом приближении. В работе предлагается методика получения уравнений, описывающих сушку в таком виде, который позволит использовать их при разработке систем автоматического регулирования.

В качестве исходных критериев для математического описания переходных процессов в сушильном барабане приняты уравнения энергетического (теплового) и материального (например, по влаге) балансов, основанных на законах сохранения энергии и массы вещества. Динамика процесса описывается уравнением энергетического и материального балансов в дифференциальной форме. Нестационарный режим работы объекта возникает при отклонении установившегося потока энергии или весового расхода на входе или выходе объекта во времени [3].

Параметры и переменные величины, характеризующие сушильный процесс, существенно меняются по длине барабана (например, температура сушильного агента $t_г$ в 8—10 раз, удельный вес газов $\gamma_г$ в 2—3 раза и т. д.). Поэтому представить барабан одним звеном при описании переходных процессов не удается. Это подтверждено исследованиями на модели.

Представим барабан, состоящим из n участков, считая, что расходы абсолютно сухого материала $G_{мс}$ и газа $L_{гс}$, коэффициент заполнения β_i, скорость перемещения материала $v_{мi}$, и газов $v_{гi}$, температура материала $t_{мi}$, теплоемкость $c_{мсi}$ и насыпной вес $\gamma_{мсi}$ сухого материала, теплоемкость $c_{гсi}$

и удельный вес $\gamma_{гсi}$ сушильных газов, теплоемкости водяных паров $c_{впi}$ и влаги $c_{влi}$, удельная теплота парообразования $r_{пi}$, остаются постоянными по длине участка.

Тогда для любого i-го участка можно составить уравнения балансов тепла и влаги в виде:

$$A_i \frac{dt_{гi}}{d\tau} = \sum Q_{j(i-1)} - \sum Q_{ji}, \qquad (1)$$

$$B_i \frac{dx_i}{d\tau} = \sum P_{j(i-1)} - \sum P_{ji}, \qquad (2)$$

где

$$A_i = (1 - \beta_i) \frac{v_{гi}}{v_{мi}} V_{бi} \gamma_{гсi} c_{гсi},$$

$$B_i = (1 - \beta_i) \frac{v_{мi}}{v_{гi}} V_{бi} \gamma_{гсi},$$

$V_{бi}$ — объем i-го участка барабана,
x_i — влагосодержание сушильного агента,
τ — время.

Таблица 1

Приход	Расход
1. С сухим газом	
$Q_1 = c_{гсi} t_{гi-1} L_{гс}$	$Q_5 = c_{гсi} t_{гi} L_{гс}$
2. С водяными парами газа	
$Q_2 = (r_{пi} + c_{впi} t_{гi-1}) x_{i-1} L_{гс}$	$Q_6 = (r_{пi} + c_{впi} t_{гi}) x_i L_{гс}$
3. С сухим материалом	
$Q_3 = c_{мсi} t_{мi-1} G_{мс}$	$Q_7 = c_{мсi} t_{мi} G_{мс}$
4. С влагой материала	
$Q_4 = c_{влi} t_{мi-1} \omega^{\circ}_{i-1} G_{мс}$	$Q_8 = c_{влi} t_{мi} \omega^{\circ}_{i} G_{мс}$
где ω°_i — влажность материала по отношению к абсолютно сухому материалу.	
	5. В виде потерь
	$Q_9 = Q_{пi}$

Дополнив уравнения (1) и (2) зависимостью вида

$$w^0_i - = a_i - b_i t_{гi}, \qquad (3)$$

где a_i, b_i — постоянные коэффициенты, ориентировочно определенные на модели, получим систему уравнений, описывающих

Таблица 2

Приход	Расход
С сушильными газами	
$P_1 = x_{i-1} L_{гс}$	$P_3 = x_i L_{гс}$
С высушиваемым материалом	
$P_2 = \omega^0_{i-1} G_{мс}$	$P_4 = \omega^0_i G_{мс}$

процесс сушки для i-го участка барабанной сушильной установки:

$$A_i \frac{dt_{ri}}{d\tau} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5 - Q_6 - Q_7 - Q_8 - Q_9, \quad (4)$$

$$B_i \frac{dx_i}{d\tau} = P_1 + P_2 - P_3 - P_4, \quad (5)$$

$$\omega^0_i = a_i - b_i t_{ri}. \quad (6)$$

Согласно уравнениям (4), (5) и (6) построена электрон-

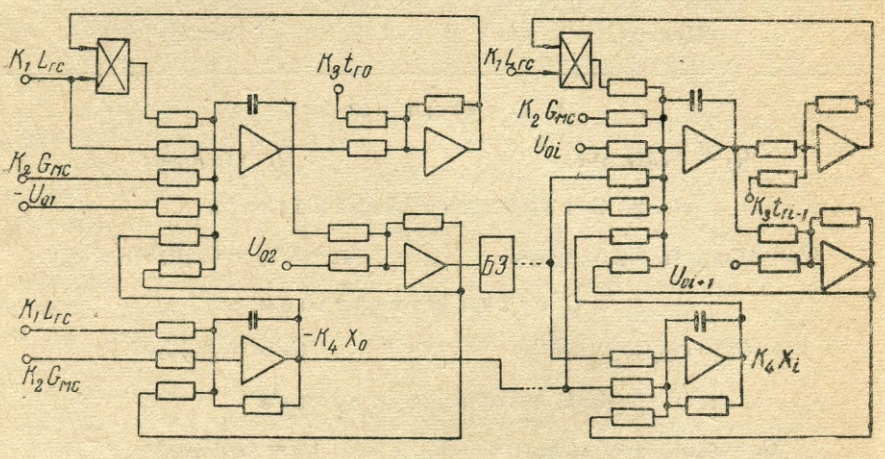

Рис. 1. Схема электронной модели сушильного барабана.

ная модель сушильного барабана для $n=3$, структурная схема которой приведена на рис. 1.

По каналу ω^0_i введено запаздывание, учитывающее время перемещения материала из одного звена аппарата в другой.

На рис. 2 приведен переходный процесс изменения влажности материала на выходе сушильного барабана при скачкообр-

разном изменении расхода материала, поступающего на сушку. Сплошной линией показан процесс, снятый на модели, пунктиром нанесена кривая, полученная институтом Южгипрошахт на Суходольской ЦОФ.

Характер переходных процессов и времена установления соответствуют опытным показателям для данного типа сушиль-

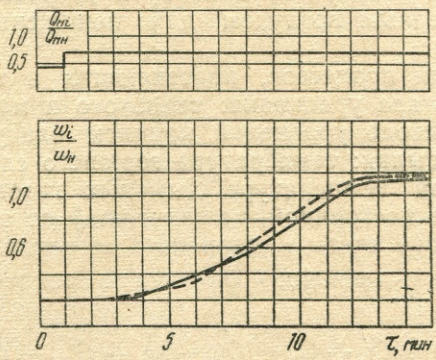

Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов.

ных барабанов, что свидетельствует о применимости изложенного принципиального подхода к построению математической модели барабана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Михайлов. Вопросы сушки топлива на электростанциях. Госэнергоиздат, 1957.
2. А. В. Лыков. Теория сушки. «Энергия», 1968.
3. В. В. Кафаров. Методы кибернетики в химии и химической технологии. «Химия», 1968.

УПРОЩЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОПОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Л. Е. Тимановская, Т. В. Макарычева, В. А. Шорох

Приводится построение упрощенной математической модели слоевого топочного устройства с цепной решеткой. Даются результаты исследований динамики процесса, полученные на аналоговой вычислительной машине типа ЭМУ-8.

Процесс горения на цепной решетке можно разделить на две характерные зоны, которые располагаются по длине решетки. Первая зона (свежего топлива) начинается непосредственно за регулятором, который определяет толщину слоя топли-