

УДК 681.5 : 51.3

Р.В. Захарченко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ СУШКИ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Методами математичного моделювання виконано аналіз режимів сушіння зерна для сушарки шахтного типу. Результати аналізу можна використати для оптимізації та вдосконалення систем управління зерносушарок.

**Ключові слова:** шахтна зерносушарка, режим сушіння, математична модель.

### Вступ

Для аналізу режимів сушіння, їх класифікації, ідентифікації та оптимізації необхідна математична модель. Аналіз відомих моделей, розроблених для сушарок шахтного типу [1 – 4], показав, що вони, як правило, описують один клас режимів і не здатні відтворювати інші (осцилюючі, ізотермічні, диференційовані і т. п.). Майже всі вони використовують лінійні зв'язки між основними змінними процесу, містять величини, малодоступні для вимірювання (парціальний тиск пари в агенті сушіння і зерні, вологовміст сушильного агента). Практика моделювання підтверджує, що лінійна модель має високу

похибку опису, а наявність важко вимірюваних параметрів призводить до проблеми її застосування в задачах автоматки.

### Результати досліджень

Нелінійна математична модель процесу сушіння в щільному рухомому шарі побудована з використанням методів матеріального балансу. У ній вологість і температура зерна є керованими змінними, температура сушильного агента і швидкість переміщення зерна по камері сушіння - керуючими змінними, а початкова вологість і температура зерна - збуджуючими факторами. Рівняння динаміки робочого процесу мають вигляд:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} = -k_w \theta((t - \tau), (x - v\tau)) w(t, x); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{r}{c} \left( \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \alpha \left[ 1 - k_\alpha \left( \frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] (T_0 - \theta(t, x)); \quad (2)$$

$w(t, 0) = w(t); \theta(t, 0) = \theta(t); w(0, x) = w(x); \theta(0, x) = \theta(x)$ ; де  $W = w$  - вологість;  $\theta = \theta_s - \theta_0$ ;  $T = \theta_{ca} - T_0$ .

Середні поточні значення, відповідно, вологості; температури зерна; температури сушильного агента;  $k_w$  - коефіцієнт внутрішнього тепловологообміну;  $k_\alpha$  - еквівалентний коефіцієнт теплообміну між зерном і агентом сушіння;  $\alpha$  - коефіцієнт, що характеризує залежність інтенсивності теплообміну між зерном і агентом у функції від швидкості випаровування вологи;  $T$  - час активації вологовиділення;  $r$  -

теплота пароутворення;  $c$  - теплоємність зерна;  $v$  - швидкість переміщення зерна;  $t, x$  - координати часу і простору.

Коефіцієнти  $k_w, k_\alpha, \alpha$  визначаються експериментально для кожного виду зерна і залежать від типу сушарки.

Перепишемо рівняння (2) підставивши у нього рівняння (1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} = -k_w \frac{r}{c} \left( \theta((t - \tau), (x - v\tau)) \right) (w(t, x)) + \alpha [1 + k_\alpha (k_w \theta((t - \tau), (x - v\tau)) w(t, x))] (T_0 - \theta(t, x)). \quad (3)$$

При стаціонарному режимі, коли початкові параметри зерна і сушильного агента є постійними, параметри зернового шару змінюються тільки у функції координати простору і в будь-якій точці

камери сушіння вони приймають постійні значення.

Тоді, прирівнявши до нуля їх похідні по часу, перепишемо рівняння (1) та (3) у вигляді:

$$v \frac{\partial w}{\partial x} = -k_w \theta(x - v\tau) w(x) \quad (4)$$

$$v \frac{\partial \theta}{\partial x} = -k_w \frac{r}{c} (\theta(x - v\tau) w(x)) + \alpha [1 + k_\alpha (k_w \theta(x - v\tau) w(x))] (T_0 - \theta(x)). \quad (5)$$

Припустивши, що швидкість зерна постійна, замінимо аргументи змінних рівнянь (4, 5), враховуючи співвідношення  $x = v\tau$ . Отримаємо систему рівнянь стаціонарного режиму сушки:

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = -k_w \theta(\tau) w(\tau); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{r}{c} \frac{\partial w}{\partial \tau} + \alpha [1 - k_\alpha \frac{\partial w}{\partial \tau}] (T_0 - \theta(x)); \quad (7)$$

Їх можна вважати рівняннями руху елементарного об'єму зернового матеріалу в синхронній системі координат. При цьому елементарний об'єм можна інтерпретувати як деяку усереднену зернину.

При чисельному експерименті з рівняннями (6, 7) частину теплофізичних параметрів і початкові умови можна взяти постійними:  $r/c = const$ ;  $W_0 = const$ ;  $\theta_0 = const$ ;  $T_0 = const$ . Тоді основними змінними параметрами будуть модельні коефіцієнти, значення яких визначаються характером і особливостями внутрішнього і зовнішнього тепло- і масообміну між зерновим шаром і агентом сушіння.

При певних співвідношеннях між швидкістю агента сушіння, його температурою і фізичними параметрами зерна в сушарці із щільним рухомим шаром поряд зі звичайними режимами, при яких температура зерна монотонно зростає, відзначаються режими, при яких в області максимальної швидкості випаровування вологи на кривій нагрівання зерна спостерігається "провал". У зв'язку з цим виникає необхідність вивчення можливих режимів сушки і їх теоретичного пояснення. Практичний інтерес представляє оптимізація режимів сушки (за собівартістю, мінімуму витрат енергії, продуктивності і т. п.).

В теорії сушіння висвітлювалася можливість коливального характеру сушки матеріалів в зоні її максимальної швидкості. Це особливо важливо для сушіння зерна при оптимальних, так званих, «ізотермічних» режимах. Механізм цього явища можна пояснити так. При певних умовах теплота, накопичена в матеріалі, викликає інтенсивне випаровування вологи. Якщо потік теплоти, що надходить від теплоносія, не компенсує дефіцит теплоти, необхідної на випаровування, матеріал охолоджується і швидкість випаровування падає, що веде до повторного нагрівання матеріалу, що сушиться. Якщо умови повторюються, то можливий вихід на наступну ступінь.

Можлива модифікація режимів. Якщо дефіцит теплоти, необхідної на випаровування вологи, компенсується, можлива стабілізація температури зерна, а при її надлишку температура зерна монотонно підвищується.

Режим коливальної сушки виникає при малих значеннях коефіцієнтів  $k_a$  та  $k_w$ , що характерно для матеріалів с великою власною теплоємністю або для тих випадків, коли матеріал віддає частину теплоти на нагрів інших об'єктів, які не беруть участі у випаровуванні.

Інші режими сушіння можуть бути змодельовані, якщо припустити, що коефіцієнт  $k_w$  постійний. Але характерною особливістю рішення в цьому випадку є те, що початкова ділянка кривої нагріву зерна зростає високим темпом, що не відповідає законамірностям, що спостерігаються в сушарках із щільним рухомим шаром.

## Висновки

Таким чином, запропонована модель фізично коректно відтворює теоретично можливі режими сушіння, в тому числі: режими з монотонним підвищенням і пониженням температури матеріалу, що сушиться, а також режими з її постійним значенням і періодичними коливаннями в зоні постійної швидкості випаровування вологи.

Модель є достатньо простою. Вона досить точно відтворює режими сушіння та має слабку чутливість до варіації параметрів. Вона може бути застосована для вирішення задач аналізу і синтезу, ідентифікації та оптимізації, пов'язаних з конструкцією і функціонуванням зернових сушарок.

## Список літератури

1. Станкевич Г.М. Сушіння зерна: Підручник / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Атаназевичос. – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
2. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна / Н.И. Малин. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
3. Окунь Г.К. Тенденции развития технологии и технических средств сушки зерна / Г.К. Окунь, А.Г. Чижиков. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987 – 52 с.
4. Жидко В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов. – М.: Колос, 1982. – 239 с.

Надійшла до редколегії 16.05.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Р.В. Захарченко

Методами математического моделирования выполнен анализ режимов сушки зерна для сушки шахтного типа. Результаты анализа можно использовать для оптимизации и совершенствования систем управления зерносушилок.

**Ключевые слова:** шахтная зерносушилка, режим сушки, математическая модель.

## ANALYSIS OF DRYING MODES BASED ON MATHEMATICAL MODEL

R. V. Zaharchenko

Analysis of modes of drying grain in the dryer shaft type is conducted of methods of mathematical modeling. The results of the analysis can be used to optimize and improve control systems of grain dryers.

**Keywords:** the mine grain dryer, drying mode, mathematical model/