

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ В ЗЕРНОСУШИЛКАХ ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**М. С. Манасян¹, Г. С. Манасян¹, И. С. Андгуладзе¹,
С. К. Манасян¹, Н. М. Андрианов^{2,3}, Ли Джен³**

¹ Красноярский государственный аграрный университет,
г. Красноярск, Россия

² Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,
г. Великий Новгород, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

Методами математического моделирования выполнен анализ режимов сушки зерна в зерносушилках шахтного типа. Установлено, что предложенная математическая модель корректно воспроизводит возможные режимы сушки. Результаты анализа можно использовать для оптимизации зерновых сушилок и их систем управления.

Ключевые слова: сушилка шахтная, режимы сушки, математическое моделирование, оптимизация

ANALYSIS OF DRYING REGIMES IN DRYERS SHAFT TYPE BASED ON MATHEMATICAL MODEL

**M. S. Manasyan¹, G. S. Manasyan¹, I. S. Andguladze¹,
S. K. Manasyan¹, N. M. Andrianov^{2,3}, Li Zhen³**

¹ Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

² Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China

Analysis of modes of drying grain in the dryer shaft type is conducted of methods of mathematical modeling. It is established that the proposed mathematical model correctly reproduces the possible modes of drying. The results of the analysis can be used to optimize grain dryers and their control systems.

Keywords: the dryer shaft, drying regimes, mathematical modeling, optimization

Для анализа режимов сушки, их классификации, идентификации и оптимизации необходима математическая модель. Анализ известных моделей, разработанных для сушилок шахтного типа [1–2], показал, что они, как правило, описывают один класс режимов и не способны воспроизводить другие (осциллирующие, изотермические, дифференцированные и т. п.). Многие из них используют линейные связи между основными переменными процесса, содержат величины, малодоступные для измерения (парциальное давление пара в сушильном агенте и зернов-

ке [2], влагосодержание сушильного агента [1]). Практика моделирования подтверждает, что линейная модель имеет высокую погрешность описания, а наличие трудно измеряемых параметров приводит к проблеме ее применения в задачах автоматики [3–11].

Нелинейная математическая модель процесса сушки в плотном подвижном слое построена с использованием методов материального баланса [3–8]. В ней влажность и температура зерна являются управляемыми переменными, температура сушильного агента и скорость перемещения зерна по

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СУШКИ В ЗЕРНОСУШИЛКАХ ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

камере сушки – управляющими переменными, а начальная влажность и температура зерна – возмущающими. Уравнения динамики рабочего процесса имеют вид:

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

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

$$w(t, 0) = w(t), \quad \theta(t, 0) = \theta(t), \\ w(0, x) = w(x), \quad \theta(0, x) = \theta(x),$$

где: $W = w - w_\infty$; $\Theta = \Theta_s - \Theta_0$; $T = \Theta_{c.a.} - T_0$ среднее текущее значение, соответственно, влажности; температуры зерна; температуры сушильного агента; k_w – коэффициент внутреннего теплооблагодобмена; k_α – эквивалентный коэффициент теплооблагодобмена между зерном и агентом сушки; α – коэффициент, характеризующий зависимость интенсивности теплооблагодобмена между зерном и агентом в функции от скорости испарения влаги; τ – время активации влагодоблагодобления; r – теплота парооблагодобления; c – теплоемкость зерна; v – скорость перемещения зерна; t, x – координаты времени и пространства.

Коэффициенты k_w, k_α, α , определяются экспериментально для каждого вида зерна и зависят от типа сушилки.

Перепишем уравнения (1–2) в виде:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} = -k_w \theta((t - \tau), (x - v\tau)) w(t, x), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + v \frac{\partial \theta}{\partial x} = -k_w \frac{r}{c} (\theta((t - \tau), (x - v\tau))) (w(t, x)) + \alpha [1 + k_\alpha (k_w \theta((t - \tau), (x - v\tau)) w(t, x))] (T_0 - \theta(t, x)). \quad (4)$$

При стационарном режиме, когда начальные параметры зерна и сушильного агента постоянны, параметры зернового слоя изменяются только в функции координаты пространства и в любой точке камеры сушки они принимают постоянные значения. Тогда, приравняв нулю их производные по времени, перепишем уравнения (3–4) в виде:

$$v \frac{\partial w}{\partial x} = -k_w \theta(x - v\tau) w(x), \quad (5)$$

$$v \frac{\partial \theta}{\partial x} = -k_w \frac{r}{c} (\theta(x - v\tau)) (w(x)) + \alpha \left[1 + k_\alpha (k_w \theta((x - v\tau)) w(x)) \right] (T_0 - \theta(x)). \quad (6)$$

Предположив, что скорость зерна постоянна, заменим аргументы переменных уравнений (5–6), учитывая очевидное соотношение $x = vt$. Получим систему уравнений стационарного режима сушки:

$$\frac{dw}{dt} = -k_w \theta(t - \tau) w(t), \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{r}{c} \frac{dw}{dt} + \alpha \left[1 - k_\alpha \frac{dw}{dt} \right] (T_0 - \theta(x)). \quad (8)$$

Их можно трактовать как уравнения движения элементарного объема зернового материала в синхронной системе координат. При этом элементарный объем имеет смысл

интерпретировать как некоторую усредненную зерновку.

При численном эксперименте с уравнениями (7–8) часть теплофизических параметров и начальные условия принимали постоянными: $r/c = 12$ °C; $W_0 = w_0 + w_\infty = 26 + 14 = 40\%$; $\Theta_0 = \Theta_{s0} - \Theta_0 = 13 - 13 = 0$ °C; $T = \Theta_{c.a.} - T_0 = 50 + 20 = 70$ °C. Основными варьируемыми параметрами являлись модельные коэффициенты, значения которых определяются характером и особенностями внутреннего и внешнего тепло- и массооблагодобмена между зерновым слоем и агентом сушки.

При определенных соотношениях между скоростью агента сушки, его температурой и физическими параметрами зерна в сушилке с плотным подвижным слоем наряду с обычными режимами, при которых температура зерна монотонно возрастает, были отмечены режимы, при которых в области максимальной скорости испарения влаги на кривой нагрева зерна наблюдается «провал» [3, 12]. В связи с этим возникает необходимость изучения возможных режимов сушки и их теоретического объяснения. Практический интерес представляет оптимизация режимов сушки (по себестоимости, минимуму затрат энергии, производительности и т. п.).

При моделировании режимов сушки овса были заданы средние значения варьируемых коэффициентов: $k_w = 0,06$; $\alpha = 0,40$; $k_\alpha = 0,90$ с шагом изменения равным, соответственно, 0,02; 0,05; 0,10.

Результаты моделирования при средних значениях коэффициентов подтверждают, что в общем случае на кривой нагрева зерна отсутствует горизонтальный участок. Это хорошо согласуется с результатами экспериментов и объясняется тем, что различные участки зерновок и зернового слоя в целом прогреваются неравномерно.

Теоретически многократно обсуждалась возможность колебательного характера сушки материалов в зоне ее максимальной скорости [4, 13]. Это особенно важно для сушки зерна при оптимальных, так называемых, «изотермических» режимах. Механизм данного явления объясняется следующим. При определенных условиях теплота, накопленная в материале, вызывает интенсивное испарение влаги. Если поток теплоты, поступающей от теплоносителя, не компенсирует дефицит теплоты, требуемой на испарение, материал несколько охлаждается и скорость испарения падает, что ведет к повторному нагреву сушеного материала. Если условия

повторяются, то возможен выход на следующую волну.

Возможна модификация режимов. Если дефицит теплоты, требуемой на испарение влаги, компенсируется, возможна стабилизация температуры зерна, а при ее избытке температура зерна монотонно повышается.

Режим колебательной сушки возникает при малых значениях коэффициентов $k_a = 0,2 - 0,3$ и $k_w = 0,02 - 0,03$, что характерно для материалов с большой собственной теплоемкостью или для тех случаев, когда материал отдает часть теплоты на нагрев других предметов, не участвующих в испарении.

Возможные режимы сушки могут быть смоделированы, если предположить, что коэффициент k_w постоянный. Но характерной особенностью решения в этом случае является то, что начальный участок кривой нагрева зерна обладает очень высоким темпом роста, что не соответствует экспериментально наблюдаемым закономерностям в сушилках с плотным подвижным слоем.

Таким образом, результатами исследования подтверждено, что предложенная модель физически корректно воспроизводит теоретически возможные режимы сушки, в том числе: режимы с монотонным повышением и понижением температуры высушиваемого материала, а также режимы с ее постоянным значением и периодическими колебаниями в зоне постоянной скорости испарения влаги.

Модель обладает достаточной простотой, а также грубостью и гибкостью. Она с хорошей количественной точностью воспроизводит режимы сушки, обладает слабой чувствительностью к вариации параметров, т. е. является корректной.

Результаты моделирования доказывают возможность адекватного решения широкого класса задач анализа и синтеза, идентификации и оптимизации, связанных с конструкцией и функционированием зерновых сушилок.

Список литературы

1. Жидко, В. И. Математическое описание процесса в шахтных зерносушилках [Текст] / В. И. Жидко // Изв. ВУЗов: Пищевая технология. – 1965. – № 5. – С. 173–178.
2. Краусп, В. Р. Математическое описание процесса сушки в шахтных зерносушилках [Текст] / В. Р. Краусп // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 1967. – № 9. – С. 31–35.
3. Колесов, Л. В. Математическое моделирование процесса сушки зерна в сушильных установках [Текст] / Л. В. Колесов, С. К. Манасян // Автоматический контроль и сигнализация в с.-х машинах: Тр. НПО ВИСХОМ. – М., 1989. – С. 101–118.

4. Манасян, С. К. К построению обобщенной математической модели процесса сушки зерна [Текст] / С. К. Манасян // Селекция, биология и агротехника сорго. – зерноград, 1984. – С. 166–172.

5. Манасян, С. К. Построение математической модели процесса сушки зерна и методы ее настройки [Текст] / С. К. Манасян // Автоматизация технологических процессов послеуборочной обработки зерна: Тр. ЛСХИ. – Л.-Пушкин, 1985. – С. 13–26.

6. Манасян, С. К. Имитационное моделирование процессов сушки зерна в зерносушилках сельскохозяйственного назначения [Текст] / С. К. Манасян // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 6. – С. 150–157.

7. Манасян, М. С. Оптимизация процессов сушки зерна [Текст] / М. С. Манасян, Н. А. Полубояринов // Сельский механизатор. – 2013. – № 8. – С. 21–23.

8. Андрианов, Н. М. Динамические характеристики процесса сушки зерна [Текст] / Н. М. Андрианов, С. К. Манасян // Тбилиси: ГНИИМЭСХ, ГЗВУИИ. – 1984. – С. 66–73.

9. А. с. 1483218 СССР. Способ автоматического регулирования процесса сушки зерна и устройство для его осуществления [Текст] / Колесов Л. В., Андрианов Н. М., Манасян С. К. // Бюл. № 20 от 30.05.1989.

10. Андрианов, Н. М. Оптимизация зерновых сушилок и их систем управления [Текст]: Депонированная рукопись № 197-В2005 10.02.2005 г. – 299 с.

11. Колесов, Л. В. Интенсификация процесса сушки в шахтных зерносушилках [Текст] / Л. В. Колесов, Н. М. Андрианов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 5. – С. 18–20.

12. Манасян, С. К. Идентификация моделей процесса сушки зерна [Текст] / С. К. Манасян // Материалы XLIII науч.-техн. конф. ЧГАУ. – Челябинск, 2004. – С. 168–174.

13. Манасян, С. К. Оптимизация моделей процесса сушки зерна [Текст] / С. К. Манасян // Материалы XLIII науч.-техн. конф. ЧГАУ. – Челябинск, 2004. – С. 174–177.

Манасян Майя Сергеевна¹ – ассистент
Манасян Георгий Сергеевич¹ – аспирант
Андгуладзе Ирина Сергеевна¹ – лаборант
Манасян Сергей Керопович¹ – д.т.н., профессор
e-mail: manasyans@mail.ru
Андрианов Николай Михайлович^{2,3} – д.т.н., профессор, e-mail: Nikolay.Andrianov@novsu.ru
Ли Джен³ – магистр

¹ ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет» (КрасГАУ), г. Красноярск, Россия

² ФГБОУ ВПО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого» (НовГУ), г. Великий Новгород, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай