

Б.І. Котов, д-р техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Р.А. Калініченко, канд. техн. наук

ВП університет біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут»

М.І. Ліпунов, ст. наук. співр.

Національний науковий центр «ІМЕСТ»

Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії

Отримано аналітичні залежності для визначення параметрів процесу сушіння на виході зерносушарки.

математична модель, системи автоматичного керування, сушіння зерна

Сутність проблеми. Процеси термообробки зерна і насіння (попереднє нагрівання, сушіння, охолодження) в поточних лініях післязбиральної обробки супроводжується значними затратами енергії, які суттєво збільшують собівартість продукції.

© Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Ліпунов, 2012

Одним із перспективних напрямків ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів без значних капіталовкладень є проведення процесів термообробки в оптимальних енергозберігаючих режимах. Однак практична реалізація цих режимів стримується такою обставиною, як недосконалість системи керування процесом, що обумовлено відсутністю простої, але адекватної формалізації тепломасообмінних процесів в поточних установках безперервної дії.

Велике різноманіття технологічних схем і конструкцій апаратів з конвективним підведенням теплоти до матеріалу спонукає застосовувати різні математичні моделі в залежності від цілі їх застосування. При цьому кожний апарат описано певною математичною моделлю, що обмежує загальний аналіз процесів і виявлення напрямків вдосконалення апаратного оформлення процесів і систем керування ними.

Необхідність інтенсифікації, оптимізації і автоматизації технологічних процесів обумовлюють подальше вдосконалення фізично обґрунтованих математичних моделей.

Аналіз публікацій та досліджень. Існуючі методи аналізу процесів термообробки дисперсних матеріалів ґрунтуються на попередній інформації про механізми кінетики сушіння, нагріву, охолодження окремих частинок яка отримується із модельних уявлень або з дослідних даних [1, 2]. В більшості наукових праць [1–3] приймається, що градієнти вологовмісту і температури незначні (із-за малих розмірів частинок) і лімітуючими факторами стадій процесу є тільки зовнішній тепло- і масообмін.

Вважається [4], що при такому припущенні камеру термообробки вологого матеріалу можна розглядати як проточний рекуператор, в якому поверхня тепло- і масообміну є сумарна поверхня дисперсного матеріалу, що знаходиться в апараті. Базуючись на результатах експериментів, обґрунтовано [5–6] припущення, що при нагрівання зерна вологовміст поверхні вищий від гігроскопічного і за вихідну фізичну модель прийнято процес випаровування з вільної поверхні, рухомою силою якого є різниця пружності водяної пари на поверхні зерна і в повітрі, або ж різниця концентрацій водяної пари [2].

Для моделювання тепло- і масообміну в рухомому шарі зерна найчастіше використовують спрощений механізм процесів, які можна описати узагальненою системою рівнянь [2–3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \tau} + 3600 \frac{\partial U}{\partial x} v_3 &= -\beta_v m \frac{76}{\rho_3 \varepsilon b} (P_n - P_T); \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm 3600 v_T \frac{\partial t}{\partial x} &= -\alpha_v \frac{\rho_3}{\rho_T \delta C_T} (t - \theta); \\ \frac{C_3 \rho_3}{\rho_T \delta C_T} \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + 3600 v_3 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\rho_3 r}{100 \rho_T C_T \delta} \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + 3600 v_3 \frac{\partial U}{\partial x} \right) &= -\frac{\alpha_v \rho_3}{\rho_T C_T \delta} (t - \theta); \\ \frac{\partial d}{\partial \tau} \pm 3600 v_T \frac{\partial d}{\partial x} &= -\frac{10 \rho_3}{\rho_T \delta} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + 3600 v_3 \frac{\partial U}{\partial \tau} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

В рівняння (1) і в подальших випадках використані такі умовні позначення: U, d – вологовміст зерна і газового теплоносія; θ, t – температура зерна і теплоносія; α_v, β_v – коефіцієнти теплообміну і вологообміну; v_3, v_T – швидкість зерна і теплоносія; ε – відношення об'єму зерна до поверхні і порозність шару; ρ_3, ρ_T – густина зерна і теплоносія; P_3, P_T – пружність водяної пари зерна і теплоносія; C_3, C_T – питома теплоємність зерна і теплоносія; r – питома теплота пароутворення.

Аналітичний розв'язок такої системи отримати неможливо, тому для опису динаміки змінення параметрів процесу рішення (1) представляють у вигляді передаточних функцій для різних каналів [1]. Але оскільки вони трансцендентні, необхідно знаходити досить точні наближення, що ускладнює подальший аналіз і розрахунки параметрів систем автоматичного керування (САК).

Мета роботи полягає у встановленні основних закономірностей змінення вологості і температури зерна і сушильного агента в процесі сушіння, які можна буде використовувати для синтезу систем керування зерносушарками неперервної дії.

Результати досліджень. Оскільки математична модель створюється для розробки і синтезу САК процесом сушіння то практичний інтерес являє динаміка зміни параметрів матеріалу (зерна) і сушильного агента на виході із сушильної камери.

Визначення динамічних характеристик вихідних параметрів можна спростити якщо з системи рівнянь (1) виключити похідні по координаті (x), замінивши їх кінцевими величинами параметрів; тобто $\frac{dx}{dh} \approx \frac{\Delta X}{\Delta H} \approx \frac{x_2 - x_1}{H}$, де H – висота сушильної камери, тоді систему (1) можна представити так:

$$m_T C_T \frac{dt}{d\tau} = Q_{T1} - Q_{T-np} - Q_{T2} - Q_{o.c.}, \quad (2)$$

$$m_z C_z \frac{d\theta}{d\tau} = Q_{z1} - Q_{T-np} - Q_{sun} - Q_{z2}, \quad (3)$$

$$m_z \frac{dU}{d\tau} = W_{z1} - W_{sun} - W_{z2}, \quad (4)$$

$$m_T \frac{dd}{d\tau} = W_{T1} + W_{sun} - W_{T2}, \quad (5)$$

де Q_{T1}, Q_{T2} – кількість теплоти, що відповідно вноситься і виноситься теплоносієм із сушильної камери в одиницю часу;

Q_{z1}, Q_{z2} – кількість теплоти що відповідно вноситься і виноситься зерном із сушильної камери в одиницю часу;

Q_{T-np} – кількість теплоти, що передається конвенцією від теплоносія до продукту;
 $Q_{вин}$ – кількість теплоти, що витрачається на випаровування вологи, і передається в оточуюче середовище;

W_{Z1}, W_{T1} – кількість вологи, що вноситься в сушильну камеру відповідно зерном і теплоносієм в одиницю часу;

W_{Z2}, W_{T2} – кількість вологи, що виноситься із сушильної камери зерном і теплоносієм одиницю часу;

$W_{вин}$ – кількість вологи, що випаровується із зерна за одиницю часу.

Окремі складові в рівняннях (2–4) визначаються очевидними співвідношеннями і рівняннями теплообміну і масообміну:

$$\begin{aligned} Q_{T1} &= G_T C_T t_1; \quad Q_{T2} = G_T C_T t_2; \quad Q_{Z1} = G_Z C_Z t_1; \quad Q_{Z2} = G_Z C_Z t_2; \\ Q_{T-np} &= \alpha f(\bar{t} - \bar{\theta}); \quad Q_{вин} = G_0 r \frac{dU}{d\tau}; \quad \frac{dU}{d\tau} G_Z = f \beta (P_S(\theta) - P_T(d)); \\ W_{Z1} &= G_Z U_1; \quad W_{Z2} = G_Z U_2; \quad W_{T1} = G_T d_1; \quad W_{T2} = G_T d_2; \\ \bar{t} &= 0,5t_1 + 0,5t_2; \quad \bar{\theta} = 0,5\theta_1 + 0,5\theta_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Математичну модель апарата для термообробки зерна в рухомому шарі знайдемо у вигляді рівнянь динаміки змінення параметрів теплоносія і зерна на виході камери, підставляючи значення (6) в (2–5). Оскільки всі процеси термообробки супроводжуються видаленням вологи, то отримана математична модель може бути використана для опису динаміки видалення вологи в сушарці безперервної дії.

Стосовно процесу конвективного сушіння зерна в рухомому шарі математична модель сформульована так:

$$m_T C_T \frac{dt_2}{d\tau} = G_T C_T (t_1 - t_2) - \alpha f(\bar{t} - \bar{\theta}); \quad (7)$$

$$m_z C_z \frac{d\theta_2}{d\tau} = G_z C_z (\theta_1 - \theta_2) + \alpha f(\bar{t} - \bar{\theta}) - r G_0 \frac{dU_2}{d\tau}; \quad (8)$$

$$m_z \frac{dU_2}{d\tau} = G_z (U_1 - U_2) - \beta f(P_S(\theta) - P_T(d)); \quad (9)$$

$$m_T \frac{dd_2}{d\tau} = G_T (d_1 - d_2) + \beta f(P_S(\theta) - P_T(d)). \quad (10)$$

Для замикання системи рівнянь (7–10) використовуємо лінійну апроксимацію залежностей:

$$P_S(\theta) = a\bar{\theta} - C, \quad P_T(d) = b\bar{d}. \quad (11)$$

Використовуючи критерій Ребіндера $Rb = \frac{C_z}{r} \frac{d\bar{\theta}}{dU}$ зробимо заміну:

$$\frac{dU_2}{d\tau} = \frac{C_z}{r Rb} \frac{d\theta}{d\tau}. \quad (12)$$

З урахуванням критерію Ребіндера і середніх значень \bar{t} і $\bar{\theta}$ представимо рівняння (7–8) у вигляді:

$$T_1 \frac{d\theta_2}{d\tau} + a_1 \theta_2 - b_1 = t_2, \quad (13)$$

$$T_2 \frac{dt_2}{d\tau} + a_2 t_2 - b_2 = \theta_2, \quad (14)$$

В рівняннях (13–14) позначено:

$$T_1 = \frac{m_z C_z}{\alpha f} (1 - Rb^{-1}); \quad a_1 = \frac{2G_z C_z}{\alpha f} + 1; \quad b_1 = t_1 + \left(\frac{2C_z G_z}{\alpha f} - 1 \right) \theta_1,$$

$$T_2 = \frac{m_T C_T}{\alpha f}; \quad a_2 = \frac{2G_T C_T}{\alpha f} + 1; \quad b_2 = \theta_1 + \left(\frac{2G_T C_T}{\alpha f} - 1 \right) t_1.$$

Розв'язок системи (13–14) відносно $\theta_2(t)$ і $t_2(\tau)$ при початкових умовах:

$$\tau = 0; \quad \theta_2 = \theta_{20}; \quad \frac{d\theta_2}{d\tau} = 0; \quad t_2 = t_{20}; \quad \frac{dt_2}{d\tau} = 0 \quad \text{отримаємо у вигляді:}$$

$$\theta_2(\tau) = \frac{\theta_{20} C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}, \quad (15)$$

$$t_2(\tau) = \frac{t_{20} C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}, \quad (16)$$

$$r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad C = a_1 a_2 - 1; \quad D_1 = b_2 + a_2 b_1; \quad D_2 = b_1 + a_1 b_2; \quad A = T_1 T_2;$$

$$B = a_1 T_2 + a_2 T_1.$$

Підставляючи в рівняння (9) значення $P_s(\bar{\theta})$ та $P_T(d)$ із (11) і значення d_2 з рівняння матеріального балансу:

$$d_2 = \frac{G_0 \cdot 10^3}{G_T} (U_1 - U_2) + d1, \quad (17)$$

після перетворення будемо мати:

$$m \frac{dU_2}{d\tau} + NU_2 = M + k_1 e^{r_1 \tau} - k_2 e^{r_2 \tau}, \quad (18)$$

$$\text{де } k_1 = 0,5\beta f a \frac{r_2 (\theta_{20} - D_1)}{C(r_1 - r_2)}; \quad k_2 = 0,5\beta f a \frac{r_1 (\theta_{20} - D_1)}{C(r_1 - r_2)}; \quad N = G_0 \left(1 + \frac{0,5\beta f b}{G_T} \right) \cdot 10^3;$$

$$M = G_0 \cdot 10^3 \left(1 + \frac{0,5\beta f b}{G_T} \right) U_1 + \beta f (b d_1 - 0,5 a \theta_1 + c).$$

Розв'язок неоднорідного рівняння (18) визначили при початкових умовах $\tau = 0; U_2 = U_{20}$:

$$U_2(\tau) = C_1 e^{-k\tau} + \frac{M}{N} + \frac{k_1 e^{r_1 \tau}}{m r_1 + N} - \frac{k_2 e^{r_2 \tau}}{m r_2 + N}, \quad (19)$$

$$\text{де } C_1 = U_{20} - \frac{M}{N} - \frac{k_1}{m r_1 + N} + \frac{k_2}{m r_1 + N}; \quad k = \frac{N}{m}.$$

Використовуючи залежності (11) і (15) перепишемо рівняння (10) у вигляді:

$$m_T \frac{dd_2}{d\tau} + N_1 d_2 = M_1 + k_2 e^{r_2 \tau} - k_1 e^{r_1 \tau}. \quad (20)$$

Розв'язок рівняння (20) за початкових умов: $\tau = 0$; $d_2 = d_{20}$ запишемо у вигляді:

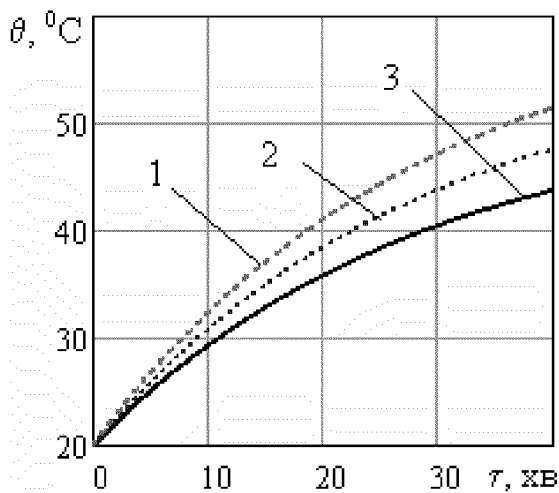
$$d_2 = C_2 e^{-k' \tau} + \frac{M_1}{N_1} + \frac{k_2}{m_T r_2 + N_1} - \frac{k_1}{m_T r_1 + N_1}, \quad (21)$$

$$\text{де } C_2 = d_{20} + \frac{M_1}{N_1} + \frac{k_2}{m_T r_2 + N_1}; \quad M_1 = (G_T - 0,5\beta fb) d_1 + \beta f(0,5a\theta_1 - C);$$

$$N_1 = G_T + 0,5\beta fb; \quad k' = \frac{N_1}{m_T}.$$

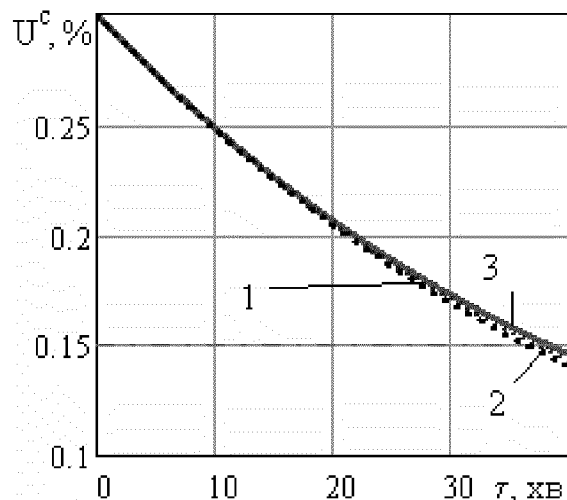
Отримані рівняння (15, 16, 18, 21) описують динаміку змінення параметрів зерна і сушильного агента на виході сушарки безперервної дії з урахуванням їх взаємозв'язку.

На рис. 1–4 зображені графічні залежності зміни параметрів зерна і теплоносія на виході із зерносушарки отримані за залежностями (15, 16, 18, 21).



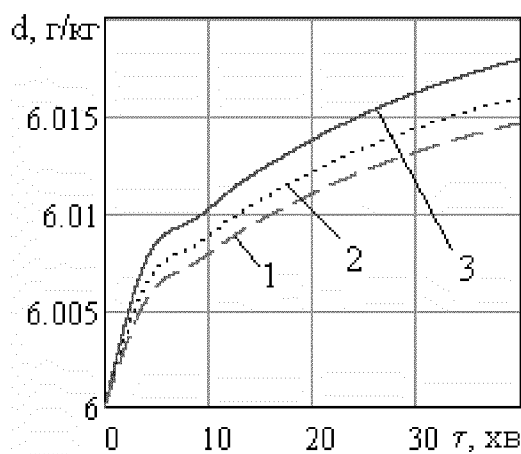
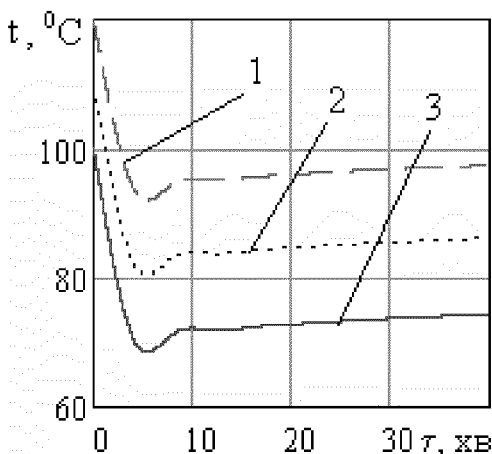
1 – $t_{10}=120^\circ\text{C}$, 2 – $t_{10}=110^\circ\text{C}$, 3 – $t_{10}=100^\circ\text{C}$

Рисунок 1 – Динаміка зміни температури зерна



1 – $t_{10}=120^\circ\text{C}$, 2 – $t_{10}=110^\circ\text{C}$, 3 – $t_{10}=100^\circ\text{C}$

Рисунок 2 – Динаміка зміни вологості зерна



1 – $t_{10}=120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $t_{10}=110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 – $t_{10}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3 – Динаміка зміни температури теплоносія

1 – $t_{10}=120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $t_{10}=110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 – $t_{10}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 4 – Динаміка зміни вологовмісту теплоносія

Висновки. Встановлені основні закономірності зміни вологості і температури зерна і сушильного агента в процесі сушіння, які можна використовувати для синтезу систем керування, що забезпечуватимуть оптимальне управління процесом сушіння зерна.

Список літератури

1. Мартиненко И.И. Автоматизация управления температурно-влажностными режимами сельскохозяйственных объектов / Мартиненко И.И., Гирнык Н.Л., Полищук В.М. – М.: Колос. 1984. – 152 с.
2. Мильман Н.Э. Математическое описание процесса сушки в шахтных зерносушилках / Н.Э. Мильман // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1967. – №9. – С. 31–35
3. Питухин Е.А. Математическая модель управления качеством работы сушильной установки барабанного типа / Е.А. Питухин // Труды Петрозаводского государственного университета серия «Прикладная математика и информатика». – 1997. – Вып. 6. – С. 1–6.
4. Рабинович Г.Д. Расчет теплообменного аппарата типа «газовзвесь» / Г.Д. Рабинович // Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах. – Минск, 1968. – С. 164–185
5. Котов Б.І. Нагрівання зерна в протитечійному режимі із штучним гальмуванням гравітаційного руху / Котов Б.І., Кіфяк В.В., Лісецький В.О. // Науковий вісник Ніжинського агротехнічного інституту. – 2009, – С. 199–204.
6. Лісецький В.О. Підвищення ефективності сушіння зерна в сушарках періодичної дії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.11 “Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва”/ В.О. Лісецький; УААН. Нац. наук. центр “Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва”. – Глеваха, 2004. – 23 с.

Б. Котов, Р. Калиниченко, М. Липунов

Аналитическое определение динамических тепловлажностных режимов зерносушилок непрерывного действия

Получены аналитические зависимости для определения параметров процесса сушки на выходе зерносушилки

B. Kotov, R. Kalinitchenko, M. Lipunov

Analytical dependences for determining the parameters of the drying process at the output of grain dryers

Analytical dependences to determine the parameters of the drying process at the output of the dryer.

Одержано 10.06.12