

Анотація

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРИМУСОВОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ПЛОДІВ І ОВОЧІВ У ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

Котов Б., Грищенко В.

У статті досліджено математичну модель процесів тепломасопереносу в щільному шарі плодів і овочів при примусовому вентиляванні.

Abstract

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC REGIMES OF FORCED VENTILATION OF FRUITS AND VEGETABLES IN THE DENSE LAYER

B. Kotov, V. Gryshenko

In the article the mathematical model of heat and mass transfer processes in a dense layer of fruits and vegetables with forced ventilation.

УДК 631.365.22

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ МІКРОНІЗАЦІЇ ЗЕРНА ПРИ ЗМІНІ ПОТУЖНОСТІ ВИПРОМІНЮВАЧІВ ЗА КООРДИНАТОЮ

Котов Б.І., д.т.н., проф., Калініченко Р.А., к.т.н., доц., Кифяк В.В., пошукач
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Наведено математичний опис динаміки нагріву зерна ІЧ-опромінюванням при змінній в напрямку руху потужності нагрівачів.

Вступ. Поживна цінність зернової частини комбікормів в значний мірі залежить від якості попередньої підготовки. Особливе місце в новітніх технологіях обробки зерна належить інфрачервоному опроміненню (ІЧВ). Одним із перспективних способів обробки є мікронізація – нагрівання зерна інтенсивним потоком ІЧ-випромінювання. В результаті мікронізації підвищується поживність корму, відбувається інактивація грибної та бактерицидної мікрофлори зерна, знижується потреба в кормах. Але підвищені енергозатрати стримують впровадження цього методу в господарствах.

Для зниження енергоємності процесу застосовують наближене розташування випромінювачів до поверхні шару зерна, що зумовлює небезпеку перегріву і навіть підгоряння частини зернівок. Для виключення можливості перегріву зерноматеріалу необхідно стабілізувати температуру зерна на крайовому рівні на протязі всього часу обробки. Однак без чітко сформульованої математичної моделі кількісно оцінити ефективність цього заходу проблематично.

Аналізом останніх досліджень [1-3] встановлена висока ефективність термічної обробки зерна ПЧ-випромінюванням, але існуючі математичні моделі відображають процес нагріву матеріалу в періодичному режимі при постійній потужності випромінювача [3]. Режими обробки зерна визначені експериментально також відтворюють процес при незмінній потужності нагрівача [4].

Метою роботи є математичний опис та встановлення закономірностей нагріву зерна при змінній в напрямку руху матеріалу потужності нагрівачів.

Методи досліджень. Специфіка роботи визначає використання аналітичного методу досліджень з наступною експериментальною перевіркою отриманих результатів.

Результати досліджень. Математичний опис одномірного перехідного процесу нагріву зерна ПЧ-випромінюванням в рухомому шарі розроблено на основі рівнянь матеріального балансу при наступних загальноприйнятих припущеннях: теплофізичні параметри і коефіцієнти тепловіддачі від температури не залежать, в часі не змінюються і дорівнюють середнім значенням за процес; нагрів зерна безградієнтний; ефекти прямого і зворотнього випромінювання враховуються в коефіцієнтах теплопередачі, потужність тепловиділень змінюється тільки за довжиною в напрямку руху; температура повітря в камері стабілізується засобами автоматики; затрати теплоти на випромінювання вологи враховуються критерієм Ребіндера. Передача теплоти випаровування враховується лінеаризованим коефіцієнтом теплообміну [4].

Для задачі, що розглядається з урахуванням зроблених припущень справедливі диференціальні рівняння:

$$m_w c_w \frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \alpha_{p1} F_w (\Theta_z - \Theta_w) + \alpha_{p2} F_w (\Theta_e - \Theta_w) - \alpha_{pr1} F_w (\Theta_w - t_v) + P_n, \quad (1)$$

$$m_e c_e \frac{\partial \Theta_e}{\partial \tau} = \alpha_{p2} F_w (\Theta_w - \Theta_e) + \alpha_{p3} F_e (\Theta_z - \Theta_e) - \alpha_{pr2} F_w (\Theta_e - t_v) = 0, \quad (2)$$

$$m_z c_z \frac{\partial \Theta_z}{\partial \tau} + G_z c_z \frac{\partial \Theta_z}{\partial x} L = A_\lambda \left(\alpha_{p1} F_w (\Theta_w - \Theta_z) + \alpha_{p3} F_e (\Theta_e - \Theta_z) - \alpha_{pr} F_z (\Theta_z - t_v) \right) - r \left(m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + G_0 L \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (3)$$

$$Rb = \frac{c \partial \Theta}{z \partial u} - \frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{C_z}{rRB} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}; \quad - \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{C_z}{rRB} \frac{\partial \Theta}{\partial x}, \quad (4)$$

де $\Theta_w, \Theta_e, \Theta_z, t_v$ – температури випромінювача, екрана, зерна та повітря, °С;
 C_{pr} – приведений коефіцієнт випромінювання;
 α_{pr} – приведений коефіцієнт теплообміну;
 P – потужність випромінювача, Вт;
 L – довжина транспортера, м;
 m_z, G_z – маса зерна в шарі та продуктивність установки, кг/с;
 $m_w c_w, m_e c_e$ – теплоємність випромінювача та екрану, Дж/°С;
 A_λ – коефіцієнт поглинання випромінювання;

g – приведена теплота пароутворення, Дж/кг;
 F_w, F_e, F_z – площі поверхонь випромінювача, екрана та зерна, м²;
 Rb – критерій Ребіндера;
 u – вологовміст матеріалу;
 T_1, T_2 – абсолютні температури поверхонь теплообміну.

Підставляючи значення рівняння (4) в рівняння (3), після перетворень отримуємо:

$$C_z \left(m_z - \frac{m_0}{Rb} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + LC_z \left(G_z - \frac{G_{z0}}{Rb} \right) \frac{\partial \Theta}{\partial x} = A_\lambda \left(\alpha_{p1} F_w (\Theta_w - \Theta_z) + \alpha_{p3} F_e (\Theta_e - \Theta_z) \right) - \alpha_{pr2} F_z (\Theta_z - t_v) \quad (3')$$

Прирівнюючи похідні у часі до 0 отримуємо систему рівнянь яка описує статичні характеристики процесу:

$$\alpha_{p1} F_w \Theta_z + \alpha_{p2} F_w \Theta_e + \alpha_{p1} F_w t_v + P_n = (\alpha_{p1} F_w + \alpha_{p2} F_w + \alpha_{pr1} F_w) \Theta_w, \quad (5)$$

$$\alpha_{p2} F_w \Theta_w + \alpha_{p3} F_e \Theta_z + \alpha_{pr2} F_e t_v = (\alpha_{p2} F_w + \alpha_{p3} F_e + \alpha_{pr2} F_e) \Theta_e, \quad (6)$$

$$\frac{1}{A_\lambda} LC_z \left(G_z - \frac{G_{z0}}{Rb} \right) \frac{\partial \Theta_z}{\partial x} = - \left(\alpha_{p1} F_w + \alpha_{p3} F_e + \frac{\alpha_{p1} F_z}{A_\lambda} \right) \Theta_z + \alpha_{p1} F_w \Theta_w + \alpha_{p3} F_e \Theta_e + \frac{\alpha_{pr2} F_z}{A_\lambda} t_v. \quad (7)$$

Позначимо:

$$\alpha_1 = \alpha_{p1} F_w \Theta_z + \alpha_{p2} F_w \Theta_e + \alpha_{p1} F_w t_v.$$

$$\alpha_2 = \alpha_{p2} F_w + \alpha_{p3} F_e + \alpha_{pr2} F_e.$$

Перепишемо рівняння (5) та (6) у вигляді:

$$\Theta_w = \frac{\alpha_{p1} F_w}{\alpha_1} \Theta_z + \frac{\alpha_{p2} F_w}{\alpha_1} \Theta_e + \frac{\alpha_{np1} F_w}{\alpha_1} t_v + \frac{P_n}{\alpha_1}, \quad (8)$$

$$\Theta_e = \frac{\alpha_{p2} F_w}{\alpha_2} \Theta_w + \frac{\alpha_{p3} F_e}{\alpha_2} \Theta_z + \frac{\alpha_{np2} F_e}{\alpha_2} t_v, \quad (9)$$

Позначимо безрозмірні комплекси:

$$K_1 = \frac{\alpha_{p1} F_w}{\alpha_1}; K_2 = \frac{\alpha_{p2} F_w}{\alpha_1}; K_3 = \frac{\alpha_{np1} F_w}{\alpha_1};$$

$$K_4 = \frac{\alpha_{p2} F_w}{\alpha_2}; K_5 = \frac{\alpha_{p3} F_e}{\alpha_2}; K_6 = \frac{\alpha_{np2} F_e}{\alpha_2}; P = \frac{P_n}{\alpha_1}; \quad (10)$$

Рівняння (8) та (9) запишемо з урахуванням (10):

$$\begin{cases} \Theta_w = K_1 \Theta_z + K_2 \Theta_e + K_3 t_v + P \\ \Theta_e = K_4 \Theta_w + K_5 \Theta_z + K_6 t_v \end{cases} \quad (11)$$

Розв'язуючи систему (11) відносно Θ_w та Θ_e отримаємо:

$$\Theta_w = \frac{K_1 + K_2 K_5}{1 - K_2 K_4} \Theta_z + \frac{K_3 + K_2 K_6}{1 - K_2 K_4} t_v + \frac{P}{1 - K_2 K_4} \quad (12)$$

$$\Theta_e = \frac{K_5 + K_1 K_4}{1 - K_2 K_4} \Theta_z + \frac{K_6 + K_4 K_3}{1 - K_2 K_4} t_v + \frac{K_4}{1 - K_2 K_4} P \quad (13)$$

Позначимо:

$$m_1 = \frac{K_1 + K_2 K_5}{1 - K_2 K_4}; n_1 = \frac{K_3 + K_2 K_6}{1 - K_2 K_4}; P_1 = \frac{P}{1 - K_2 K_4}; m_2 = \frac{K_5 + K_1 K_4}{1 - K_2 K_4};$$

$$n_2 = \frac{K_6 + K_4 K_3}{1 - K_2 K_4}; P_2 = \frac{K_4}{1 - K_2 K_4}.$$

тоді:

$$\Theta_w = m_1 \Theta_z + n_1 t_v + P_1; \Theta_e = m_2 \Theta_z + n_2 t_v + P_2. \quad (14)$$

Підставимо значення Θ_w та Θ_e в рівняння (7) та використовуючи позначення отримаємо:

$$\frac{C_z}{A_\lambda} L \left(G_z - \frac{G_z}{Rb} \right) = T^x;$$

$$A' = \alpha_{p1} F_w + \alpha_{p3} F_e + A_\lambda^{-1} \alpha_{np1} F_z;$$

$$B' = \alpha_{p1} F_w;$$

$$C' = \alpha_{p3} F_e;$$

$$T_x \frac{\partial \Theta_z}{\partial x} = b - \Theta_z. \quad (15)$$

де $T_x = \frac{G_z L (G_z - G_{z0} / Rb)}{A_\lambda (A' - B' m_1 - C' m_2)}$;

$$b = B_1 + B_2;$$

$$B_1 = \frac{(B' n_1 + C' n_2 + A_\lambda^{-1} \alpha_{np1} F_z) t_v + C' P_2}{A' - B' m_1 - C' m_2};$$

$$B_2 = \frac{B' P_1}{A' - B' m_1 - C' m_2}.$$

Розв'язок (15) при граничних умовах: $x=0$, $\Theta_2 = \Theta_{z1}$ (Θ_{z1} – значення температури зерна на вході в установку):

$$\Theta_z(x) = b - (b - \Theta_{z1}) e^{-\frac{x}{T_x}}. \quad (16)$$

Розглянемо статичну характеристику об'єкту при зміні потужності

випромінювачів вздовж координати X за законом:

$$P_1 = P_o e^{-kx}, \quad (17)$$

де P_o – максимальна потужність нагрівача.

Рівняння (15) перепишемо у вигляді:

$$T_x \frac{d\Theta_z}{dx} + \Theta_z = B_1 + B_2 P_o e^{-kx}. \quad (18)$$

Розв'язок неоднорідного рівняння (18) має вигляд:

$$\Theta_z(x) = c_1 e^{-\frac{x}{T_x}} + B_1 T_x + \frac{B_2 T_x}{1 - T_x k} e^{-kx}. \quad (19)$$

Сталу інтегрування c_1 знайдемо із граничних умов ($x = 0$; $\Theta_z = \Theta_{z1}$):

$$c_1 = \Theta_{z1} - b_1 T_x - \frac{b_2 T_x}{1 - T_x k}, \quad (20)$$

де Θ_{z1} – температура зерна на вході в мікронізатор.

На рис. 1 показано розподіл температури вздовж транспортного засобу при постійній і розподіленій потужності випромінювачів.

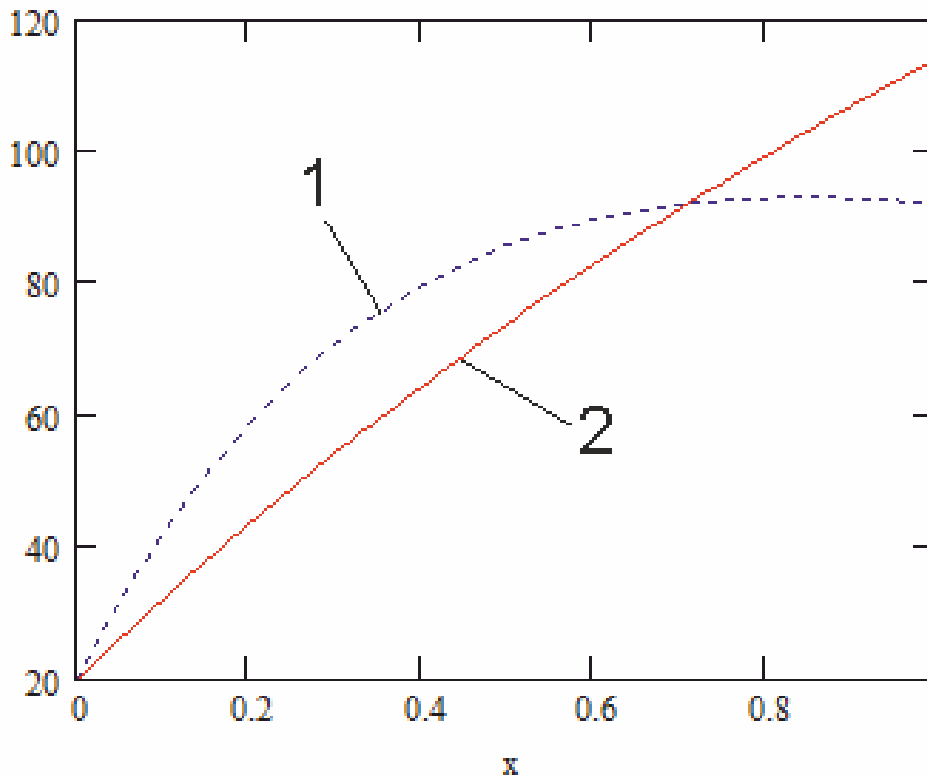


Рис. 1 – Змінювання температури зерна при зміні потужності випромінювачів за координатою: 1 – $P = 40 \exp(-2.1x)$; 2 – $P = 20$ кВт.

Для опису динаміки нагріву вологого матеріалу при ГЧ-опроміненні підставимо значення температури екрана Θ_e з рівняння (11) в рівнянні (1) та (3) та значення $d\Theta_z/dx$ з (16) в рівняння (3). Після перетворень отримуємо нову систему рівнянь:

$$T_1 \frac{d\Theta_w}{d\tau} = \Theta_z - a_1 \Theta_w + b_1; \quad (21)$$

$$T_2 \frac{d\Theta_w}{d\tau} = \Theta_z - a_2 \Theta_w + b_2; \quad (22)$$

$$b_2 = b_2(x);$$

де:
$$T_1 = \frac{m_w c_w}{(\alpha_{p1} + \alpha_{p2} K_5) F_w}; \quad T_1 = \frac{C_z \left(m_z - \frac{m_{z0}}{Rb} \right)}{A_\lambda (\alpha_{p1} + \alpha_{p2} K_5) F_w};$$

$$a_1 = \frac{(\alpha_{p1} + \alpha_{p2} + \alpha_{np2} - \alpha_{p2} K_5) F_w}{(\alpha_{p1} + \alpha_{p2} K_5) F_w};$$

$$b_1 = \frac{P_n + (\alpha_{p1} + \alpha_{p2} K_6) F_w t_v}{(\alpha_{p1} + \alpha_{p2} K_5) F_w}; \quad a_2 = \frac{\alpha_{p1} F_w + \alpha_{np} F_z A_\lambda^{-1} + \alpha_{p3} F_e (1 - K_5)}{\alpha_{p1} F_w + \alpha_{p3} F_e K_4};$$

$$b_2 = \frac{\frac{\alpha_{np} F_z}{A_\lambda} + \alpha_{p3} F_e K_6 - F(x)}{\alpha_{p1} F_w + \alpha_{p3} F_e K_4}; \quad F(x) = \frac{C_z}{A_\lambda} L \left(G_z - \frac{G_{z0}}{Rb} \right) f_1(x);$$

$f_{1,2}(x)$ – похідна від $\Theta_z(x)$ (з рівнянь (16) або (19)).

Рішення системи рівнянь (21) – (22) відносно Θ_w і Θ_z отримано у вигляді:

$$A \frac{d^2 \Theta_w}{d\tau^2} + B \frac{d\Theta_w}{d\tau} + C \Theta_w = D_1; \quad (23)$$

$$A \frac{d^2 \Theta_z}{d\tau^2} + B \frac{d\Theta_z}{d\tau} + C \Theta_z = D_2; \quad (24)$$

де $A_1 = T_1 T_2$; $B = T_1 a_2 + T_2 a_1$; $c = a_1 a_2 - 1$; $D_1 = b_2 + a_1 b_2$; $D_2 = b_1 + a_1 b_2$.

Кінцеві рівняння динаміки нагріву випромінювачів та зерна з урахуванням розподілення температури зерна в напрямку руху представлені у такому вигляді:

$$\Theta_w(\tau) = r_1 \frac{\Theta_w C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}; \quad (25)$$

$$\Theta_z(\tau, x) = r_1 \frac{\Theta_{z0} C - D_2(x)}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2(x)}{C}. \quad (26)$$

Висновки

Отримані аналітичні залежності, які характеризують статичні та динамічні характеристики об'єкту досліджень можна використовувати для розв'язку задачі ІЧ-нагрівання зерна в двох постановках:

1. За даним графіком нагріву зерна визначити необхідне для його здійснення розподілу густини потоку від випромінювачів за довжиною мікронізатора.

2. Визначити динаміку нагріву матеріалу при змінній густині потоку від випромінювачів.

Список використаних джерел

1. Елькин Н.Я. Теория и практика инфракрасной обработки зерна и крупы / Н.Я.Елькин, В.Б.Скребкова, В.В.Кудряшкин // Хранение и переработка зерна. -2006. №4. - С. 26-30.
2. Соболевський В. Ігноруємо ми й досі мікронізацію зерна / В.Соболевський, В.Горбенко, К.Кузнецова // Зерно і хліб. -2005. №2.- С.16-17.
3. Зверев С.В. Моделирование процессов ИК-нагрева зерна // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2005. №12. - С.25-26.
4. Котов Б.І. Аналітичне дослідження перехідних режимів нагрівання зерна в електротерморадіаційних установках безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, В.В. Кифяк // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. 2012. Вип. 131.- С.57-65.

Аннотація

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МИКРОНИЗАЦИИ ЗЕРНА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПО КООРДИНАТЕ

Котов Б., Калініченко Р., Кифяк В.

Приведено математическое описание динамики нагрева зерна ИК-излучением при переменной в направлении движения мощности нагревателей.

Abstract

MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC MODES MICRONIZATION GRAIN WHEN THE POWER EMITTERS COORDINATE

B. Kotov, R. Kalinichenko, V. Kifyak

The mathematical description of the dynamics of the heating of grain IR radiation at variable power in the direction of the heaters.