



УДК 631.362:621.365.46

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК ТЕРМООБРОБКИ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ КОМБІКОРМІВ

Котов Б.І., д.т.н.,

Лисенко В.П., к.т.н.,

Комарчук Д.С., аспірант\*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Калініченко Р.А., к.т.н.

*ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут"*

Тел.: (044) 527-83-82

**Анотація** - розглянуто математичні модель процесів термообробки фуражного зерна при використанні інфрачервоного та індукційного енергопідігріву, та метод ідентифікації її параметрів.

**Ключові слова** - математичне моделювання, зерно, термообробка, ІЧ-нагрів, кондуктивний нагрів, тепловий процес.

*Постановка проблеми.* Для збільшення виробництва високоякісних комбікормів в кількостях, що забезпечили б потреби тваринництва та птахівництва необхідно подальше вдосконалення існуючої технології і обладнання, що дозволить максимально автоматизувати технологічні процеси. В технологічних процесах виробництва повнорационних комбікормів все ширше застосовують операції інтенсивної термічної обробки фуражного зерна з метою підвищення його поживної цінності, до яких відноситься екструдування і мікронізація. Для дослідження обрані в якості типових два об'єкти електронагрівальних установок: прес-екструдер з індукційним підведенням енергії та мікронізатор з ІЧ-випромінювачем[1-4].

*Аналіз останніх досліджень.* При вирішенні задач автоматизації керування температурними режимами суттєве значення має характер залежностей регульованих параметрів в часі при зміні (управляючих або збурюючих) параметрів технологічного процесу. Визначення динамічних властивостей об'єкта можна виконати експериментально або аналітично. Останній метод більш універсальний. Він дозволяє визна-

---

© Б.І. Котов, д.т.н.; В.П. Лисенко, к.т.н.; Р.А. Калініченко, аспірант;  
Д.С. Комарчук к.т.н.

\* Науковий керівник – д.т.н., професор Б.І. Котов

чити структурну модель об'єкта без конкретизації параметрів елементів конструкцій та умов експлуатації, бо навіть типові обладнання має суттєві розбіжності які в значній мірі визначають динаміку об'єкта.

Аналізом існуючих методів дослідження процесів термообробки фуражного зерна електрофізичними методами [5,6] встановлено, що динаміка зміни параметрів процесу визначається тільки для температури зерно матеріалів, а зміна температури нагрівачів не визначається, хоча саме нагрівач є регулюючим елементом об'єкта.

В даній роботі використано аналітично-експериментальний метод ідентифікації інерційних об'єктів (який є загальним для типових установок нагріву дисперсних матеріалів), сутність якого полягає в тому, що на першому етапі складаються диференціальні рівняння енергетичного балансу, які відображають технологічний процес. Після розв'язку рівнянь невідомі коефіцієнти та комплекси визначаються співставленням теоретичної і експериментальної залежностей.

*Формулювання цілей статті.* Створення математичної моделі динаміки електронагрівачів та ідентифікація її параметрів.

*Основна частина.* З точки зору математичного опису електронагрівальні установки вказаного типу є складною багатопараметричною системою з багатьма вхідними і вихідними величинами. Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що зміна температури матеріалу при кондуктивному і радіаційному підведенні теплоти має типовий експоненціальний характер (рис. 1). Дана обставина дозволяє будувати математичні моделі на основі аналізу теплового балансу, який визначає зв'язок між вхідними та вихідними параметрами.

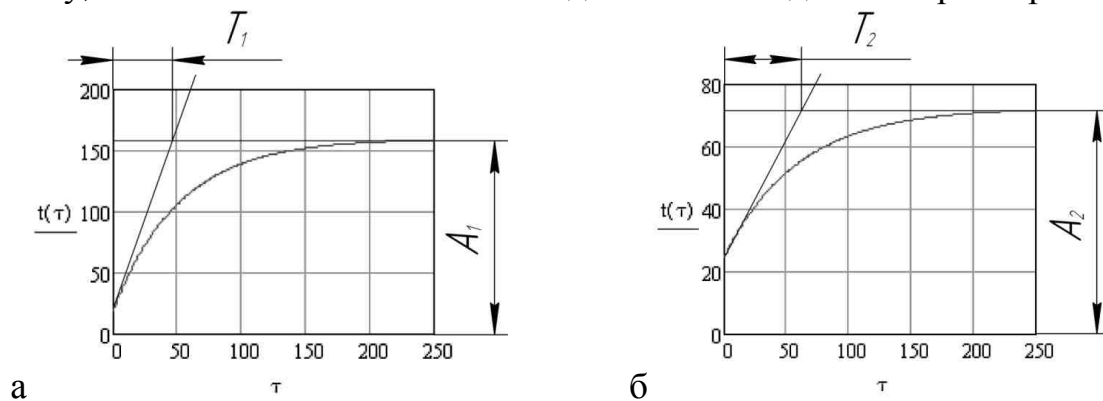


Рис. 1. Крива розгону системи «нагрівач-шар зерна».  $t(\tau)$ , °C;  $\tau$ , с:

а – при кондуктивному підведенні тепла; б – при ІЧ опроміненні.

Представимо типову електронагрівну установку, як систему з двома ємностями нагрівач та дисперсний матеріал. Вхідний параметр – підведена потужність, вихідний – температура матеріалу, збурюючий вплив температура оточуючого середовища.

Тепловий баланс за умов рівномірного (безградієнтного) прогрі-

ву цієї товщини матеріалу можна представити спрощеною схемою: енергія, що виділяється в нагрівному елементі витрачається на підвищення його температури і передається матеріалу, де витрачається на підвищення температури матеріалу та віддачу теплоти в оточуюче середовище.

Математичну модель взаємодії системи «нагрівач-матеріал» в процесах мікронізації та екструзії представлено системою диференціальних рівнянь:

$$m_1 c_1 \frac{d\Theta}{d\tau} = P - \alpha_{n(e)} f_1 (\Theta - t) - \alpha_v f_2 (\Theta - t_v), \quad (1)$$

$$m_2 c_2 \frac{dt}{d\tau} = \alpha_{n(e)} f_1 (\Theta - t) - \alpha_v f_3 (t - t_v), \quad (2)$$

де  $\Theta, t_1, t_v$  - відповідно температура нагрівача, матеріалу та зовнішнього середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$m_1 c_1, m_2 c_2$  - теплоємність нагрівача та матеріалу,  $\text{Дж}/^{\circ}\text{C}$ ;

$f_1, f_2, f_3$  - відповідно поверхня теплообміну, нагрівача матеріалу та нагрівача зовнішнього середовища,  $\text{м}^2$ ;

$\alpha_n, \alpha_e, \alpha_v$  - коефіцієнти теплообміну випромінюванням, кондуктивний та конвективним переносом,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{}^{\circ}\text{C}$ ;

$P$  - підведена потужність,  $\text{Вт}$ .

Параметри які підлягають визначенню експериментально є комплекси:  $\alpha_n f_1, \alpha_e f_2, \alpha_v f_3$  та  $\Theta$ . Оскільки випромінювач є складною конструкцією для подальшого аналізу використовують його ефективну температуру, а втрати в оточуюче середовище враховують коефіцієнтом корисної дії випромінювача –  $\eta$ .

Тобі рівняння (1) спростимо

$$m_1 c_1 \frac{d\Theta}{d\tau} = P\eta - \alpha_n f_1 (\Theta - t). \quad (1a)$$

За умови повністю розігрітого випромінювача  $d\Theta/d\tau=0$ , з рівнянь (1a) та (2) при початкових умовах:  $\tau=0; t=t_0$  отримаємо

$$t(\tau) = A - (A - t_0) e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (3)$$

де  $A = \frac{P\eta A_1}{\alpha_v f_3} + t_v; T = \frac{m_2 c_2}{\alpha_v f_3}$ .

Величини  $A$  – значення температури в сталому режимі ( $\tau \rightarrow \infty$ );  $T$  – стала часу, визначимо з кривої нагріву матеріалу (рис. 1a). Знаючи величини  $T=T_1, A=A_1$  визначимо  $\alpha_v = \frac{m_2 c_2}{f_3 T_1}$  та  $\eta = \frac{(A_1 - t_v) \alpha_v f_3}{P A_\lambda}$ , де  $A_\lambda$  – коефіцієнт поглинання випромінювання зерновим матеріалом.

Зміну температури нагрівача (випромінювача) отримаємо з рівняння (1а), підставляючи в нього значення  $t(\tau)$  з виразу (3)

$$\frac{m_1 c_1}{\alpha_1 f_1} \frac{d\Theta}{d\tau} + \Theta = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} \left( A - \Delta e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (4)$$

де  $\Delta = A - t_0$ .

Розв'язок неоднорідного рівняння (4) за початкової умови:  $\tau=0$ ;  $\Theta=\Theta_0$

$$\Theta_n(\tau) = \left( \Theta_0 - \frac{B_1}{B_3} + \frac{B_2}{B_3 - k} \right) e^{-B_3 \tau} + \frac{B_1}{B_3} - \frac{B_2}{B_3 - k} e^{-k\tau}, \quad (5)$$

де  $B_1 = \frac{P\eta + \alpha_n f_1 \Theta_3}{m_1 c_1}$ ;  $B_2 = B_3(\Theta_3 - \Theta_0)$ ;  $B_3 = \frac{\alpha_1 f_1}{m_1 c_1}$ ;  $k = \frac{1}{T}$ .

$\Theta_3$  – температура зерна в усталеному режимі ( $\Theta_3=A_1$ )

Величина  $\frac{B_1}{B_3} = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} + \Theta_3$  – є сталою температурою нагрівача

$$\alpha_1 f_1 = \frac{P\eta}{\Theta_1 - \Theta_3}. \quad (6)$$

Визначивши комплекси  $\alpha_1 f_1$  та  $\alpha_2 f_2$ , при відомих сталих величинах можна розв'язувати рівняння (1а) та (2) чисельним або аналітичним методом.

Розв'язуючи систему (1а) – (2) рівнянь відносно  $\Theta$  та  $t$  маємо:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Theta}{d\tau^2} + (T_1 + a_2 T_1) \frac{d\Theta}{d\tau} + (a_2 - 1)\Theta = D_1, \quad (7)$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 t}{d\tau^2} + (T_1 + a_2 T_1) \frac{dt}{d\tau} + (a_2 - 1)t = D_2, \quad (8)$$

де  $T_1 = \frac{m_1 c_1}{\alpha_1 f_1}$ ;  $T_2 = \frac{m_2 c_2}{\alpha_2 f_2 A_\lambda}$ ;  $a_2 = 1 + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda}$ ;

$$D_1 = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} a_2 + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda} t_v; \quad D_2 = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda}.$$

Розв'язок рівнянь (7) та (8) за початкових умов:  $\tau=0$ ;  $t=t_0$ ;  $\Theta=\Theta_0$ , після відповідних перетворень отримаємо:

$$\Theta(\tau) = \frac{\Theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}, \quad (9)$$

$$t(\tau) = \frac{t_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}. \quad (10)$$

Графічну інтерпретація рівнянь (9) та (10) подано на рис. 2.

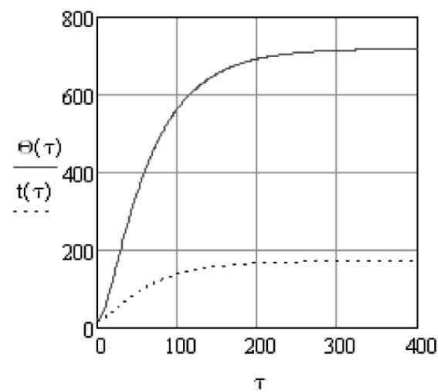


Рис. 2. Залежності зміни температури випромінювача  $\Theta(\tau)$  та зерна  $t(\tau)$  в перехідному режимі мікронізатора.  $\Theta(\tau), t(\tau), ^\circ\text{C}; \tau, \text{с}$ .

Аналогічним методом, використовуючи експериментальну залежність  $t(\tau)$  нагріву зерна при кондуктивному підведенні теплоти від елемента поверхні, що нагрівається індуктором (рис. 1б) отримуємо значення ефективного коефіцієнту тепловіддачі  $\alpha_{ef}$  від поверхні та коефіцієнту  $\alpha_{ш}$ , що характеризує тепловіддачу шнека. Це дає можливість ідентифікувати математичну модель теплового режиму пресекструдера та за рівняннями типу (9) – (10) побудувати графіки перехідного процесу (рис. 3).

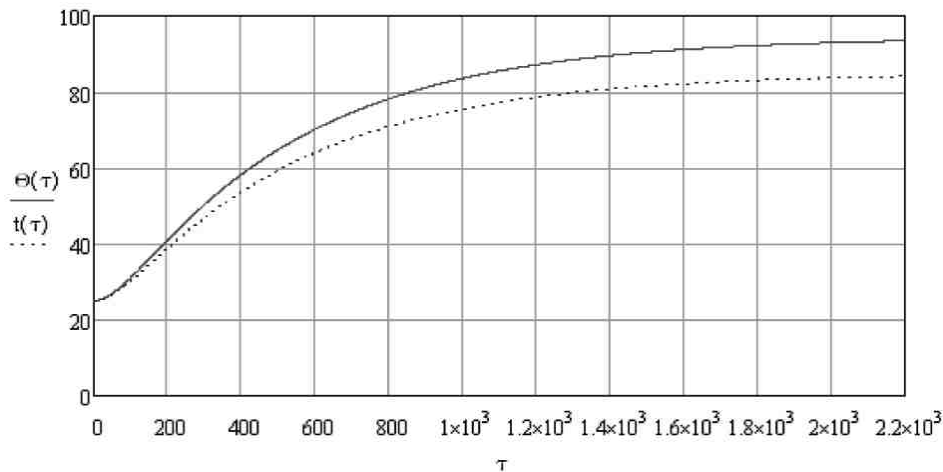


Рис. 3. Залежності зміни температури нагрівача  $\Theta(\tau)$  та зерна  $t(\tau)$  в перехідному режимі екструдера.  $\Theta(\tau), t(\tau), ^\circ\text{C}; \tau, \text{с}$ .

*Висновки.* Запропоновані математичні моделі адекватно описують динамічні режими електронагрівальних установок. В процесах нагріву зерно матеріалів можливе перевищення їх максимально допустимої температури нагріву. Тому режими нагріву необхідно регулювати засобами автоматики.

Література

1. Жисмин Я.М. Оборудование для производства комбикормов и обогатительных смесей / Я.М. Жисмин. – М. Колос. – 1976 – 160 с.
2. Королев М.И. Совершенствование процесса экструдирования фуражного зерна / М.И. Королев. – Научные труды ВИМ т. 66. . – о 1986. с. 124-131.
3. Павлов С.А. Эффективность использования зерна ячменя, обработанного инфракрасным излучением в составе комбикормов / С.А. Павлов // Научно технический бюл. ВИМ 1986 № 63 с. 34-37.
4. Орлов А.И. Тепловая обработка зерна при производстве комбикормов / А.И. Орлов, Н.В. Лисицына, В.А. Афанасьев. – Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность., 1976. - № 12. – С. 12-14.
5. Зверев С.В. Моделирование процессов ИК-нагрева зерна / С.В. Зверев //Хранение и переработка сельхозсерья. 2005 №12 с 25-26.
6. Новикова В.А. Термообработка фуражного зерна / В.А. Новикова // Сільський механізатор. – 2005. - №11. – 28-29.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЗЕРНО, ТЕРМООБРАБОТКА, ИК-НАГРЕВ, КОНДУКТИВНЫЙ НАГРЕВ, ТЕПЛОЙ ПРОЦЕСС**

*Котов Б.И., Лысенко В.П., Комарчук Д.С., Калиниченко Р.А.*

**Аннотация** - рассмотрены математические модели процессов термообработки фуражного зерна при использовании инфракрасного и индукционного нагрева, и метод идентификации ее параметров.

### **MATHEMATICAL MODELING, GRAINS, HEAT PROCESSING, INFRARED HEATING, CONDUCTIVE HEATING, HEAT PROCESSING**

*B. Kotov, V. Lysenko, D. Komarchuk, R. Kalinichenko*

#### **Summary**

**The mathematical model of thermal processes of feed grain using infrared and induction sources, and method of identification parameters in thermal processes are considered.**