

Калініченко Р. А.

*Національний  
університет  
біоресурсів і  
природокористування  
України*

Солона О. В.

Твердохліб І. В.

*Вінницький  
національний аграрний  
університет*

Kalinichenko R. A.

*National University of Life  
and Environmental  
Sciences of Ukraine*

Solona O. V.

Tverdokhlib I. V.

*Vinnitsia National  
Agrarian University*

УДК 636.086.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО- КОНВЕКТИВНОЇ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНА У ВІБРОКИПЛЯЧОМУ ШАРІ

*В статті розглянуті аналітичні математичні моделі процесів термічної обробки зернових матеріалів. Визначено енергетичні особливості термообробки зерна при різних способах підведення теплоти. Досліджено вплив низхідного повітряного потоку на характер ІЧ-термообробки.*

*Ключові слова: термообробка; математична модель; вібраційний транспортер.*

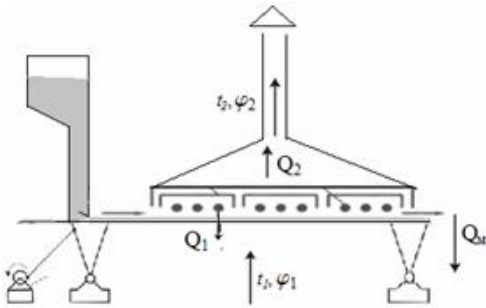
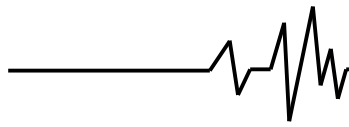
**Постановка проблеми.** Останнім часом велике значення приділяється вивченню і впровадженню різних методів теплової обробки зерна, як одному з шляхів підвищення ефективності використання зернопродуктів. Серед різних способів термічної обробки зернових кормових матеріалів процес мікронізації належить до числа найбільш ефективних [1]. При мікронізації підвищується поживність, скорочуються затрати енергії на перетравність кормів, відбувається дезінсекція зерна та інактивація грибної і бактеріальної мікрофлори поверхні зерна. Однак, одним із стримуючих чинників впровадження цього способу є висока енергоємність процесу мікронізації (150 кВт·ч / т і більше) [2]. Тому для вдосконалення процесу мікронізації з метою зниження питомих енерговитрат були проведені теоретичні дослідження для обґрунтування параметрів і режимів роботи машин для ІК-термообробки зерна.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У роботі [3] основними методами дослідження процесу мікронізації є експериментальні і спрямовані вони на удосконалення режимних

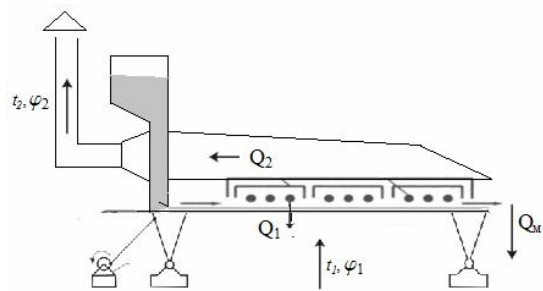
параметрів процесу. У дослідженнях [4] застосовуються найбільш прийнятні методи математичного моделювання, проте досліджені моделі не враховують всіх значущих чинників які впливають на процес ІК-термообробки зерна. Мікронізація зерна у віброкиплячому шарі дозволяє рівномірно розподіляти променисту енергію в шарі зерноматеріалу [5]. У роботі [6] обґрунтований енергоефективний радіаційно-конвективно-вакуумний спосіб термообробки, але не розкриті його можливості і межі застосування при обробці зерна в віброкиплячому шарі.

**Мета роботи.** Розробка математичних моделей динамічних режимів роботи установок ІЧ-нагріву зерна на вібраційному транспортері в низхідному повітряному потоці.

**Виклад основного матеріалу.** В існуючих установках для ІЧ-термообробки зерна тепло  $Q_1$  від ІЧ-ламп витрачається на радіаційний нагрів оброблюваного матеріалу  $Q_m$  і втрачається в навколишньому середовищі  $Q_2$  (рис. 1).



**Рис. 1. Структурна класична схема ІЧ-термообробки зерна**



**Рис. 2. Структурна схема ІЧ-термообробки з попереднім підігрівом зерна**

Відповідно рівняння енергетичного балансу можна записати так:

$$dQ_1 = dQ_m + dQ_2$$

$$dQ_m = dQ_{p.n} + dQ_{m.o.n} + dQ_{вип.} \quad (1)$$

$$dQ_2 = dQ_{p.n.y} + dQ_{к.о.н}$$

де  $dQ_{p.n}$  – кількість теплоти що поглинається матеріалом від радіаційного нагріву,  $dQ_{m.o.n}$  – теплообмін конвекцією зерноматеріалу з оточуючим повітрям, нагрів зерноматеріалу,  $dQ_{вип.}$  – кількість теплоти що витрачається на випаровування води в матеріалі,  $dQ_{p.n.y}$  – радіаційний нагрів установки,  $dQ_{к.о.н}$  – конвекційний нагрів оточуючого повітря.

За такої схеми енергія від ІЧ-ламп продуктивно передається зерноматеріалу тільки радіаційним способом.

Для підвищення енергоефективності установок нагріте повітря від ІЧ-ламп використовують для попереднього нагріву зерноматеріалу (рис. 2).

Співвідношення енергетичного балансу для даної схеми можна записати так:

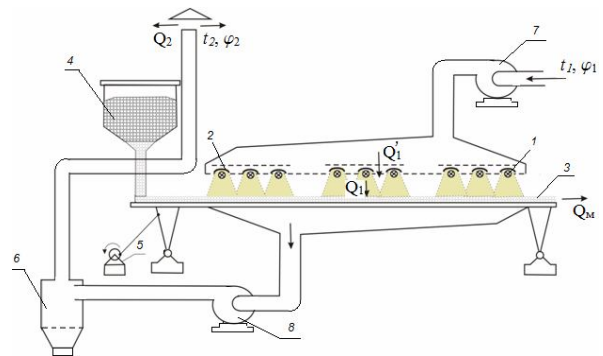
$$dQ_1 = dQ_m + dQ_2$$

$$dQ_m = dQ_{p.n} + dQ_{к.н} + dQ_{m.o.c.} + dQ_{вип.} \quad (2)$$

$$dQ_2 = dQ_{p.n.y} + dQ_{к.о.н} - dQ_{к.н}$$

За такої схеми основний спосіб нагріву зерноматеріалу радіаційний, але для підвищення ККД установки конвекційний нагрів –  $dQ_{к.н}$  повітря від ІЧ-ламп використовується для попереднього підігріву зерна.

За дослідженнями [6] ІЧ-термообробку рослинних зерноматеріалів для підвищення енергоефективності процесу доцільно проводити радіаційно-конвективно-вакуумним способом. Такий спосіб термообробки реалізується в установці структурна схема якої представлена на рис. 3.

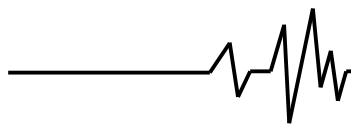


**Рис. 3. Структурна схема ІЧ-термообробки радіаційно-конвективно-вакуумним способом (1-ІЧ-лампа, 2-відбивач, 3-віброклящий шар зерна, 4-зерновий бункер, 5-вібратор, 6-циклон, 7,8-вентилятори)**

Найбільшу інтенсивність термообробки за такої схеми можна пояснити тим, що такий режим поєднує комбінацію двох способів підведення теплоти: радіаційного та конвективного. Розріджене середовище в зоні термообробки, що створює витяжний вентилятор 8, інтенсифікує процес випаровування води із зерноматеріалу, а також знепилює процес. Інфрачервоні промені забезпечують інтенсивність теплопередачі, а низхідний повітряний потік направлений узгоджено з радіаційним потоком, сприяє рівномірному розподілу теплоти по всій товщині зерноматеріалу.

Наявність низхідного потоку повітря, що пронизує шар зерна запобігає підгорянню поверхні зерна, це дозволяє інтенсифікувати процес термообробки зменшенням відстані від ІЧ-нагрівачів до шару зерна і збільшенням теплового напору.

Математичну модель радіаційно-конвекційної термообробки шару зерноматеріалу можна сформулювати на основі рівнянь енергетичного балансу (2):



$$\begin{aligned}
 m_3 c_3 \frac{d\theta}{d\tau} &= \sigma_0 C'_{pr1} (T_n^4 - T_3^4) + \alpha_3 F_3 (t - \theta) + G_3 c_3 (\theta_1 - \theta_2) - r G_0 \frac{dU}{d\tau} \\
 m_n c_n \frac{dt}{d\tau} &= G_n c_n (t_1 - t_2) + \alpha_n F_n (\bar{\theta}_n - \bar{t}) + \alpha_3 F_3 (\theta - t) \\
 \frac{dU}{d\tau} &= k(U - U_p)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

де  $\theta, t$  – температура зерна і повітря,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C'_{pr1}$  – коефіцієнт випромінювання;  $\alpha_3, \alpha_n$  – коефіцієнти теплообміну повітря із зерном і лампами, відповідно;  $k$  – коефіцієнт сушіння;  $m_3, G_3$  – маса зерна в шарі і продуктивність установки, кг, кг/с;  $m_n, G_n$  – маса і витрати повітря установки, кг, кг/с;  $r$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг;  $G_0$  – кількість випареної вологи, кг;  $U$  – вологовміст матеріалу, кг/кг;  $T_n,$

$T_3$  – абсолютні температури ІЧ-нагрівача і зерна,  $^{\circ}\text{K}$ .

Провівши чисельні експерименти використовуючи систему (3), отримаємо поверхні експозиції мікронізації зернового матеріалу від визначальних параметрів (рис. 4), що дозволяє визначати швидкість переміщення зерноматеріалу в установці.

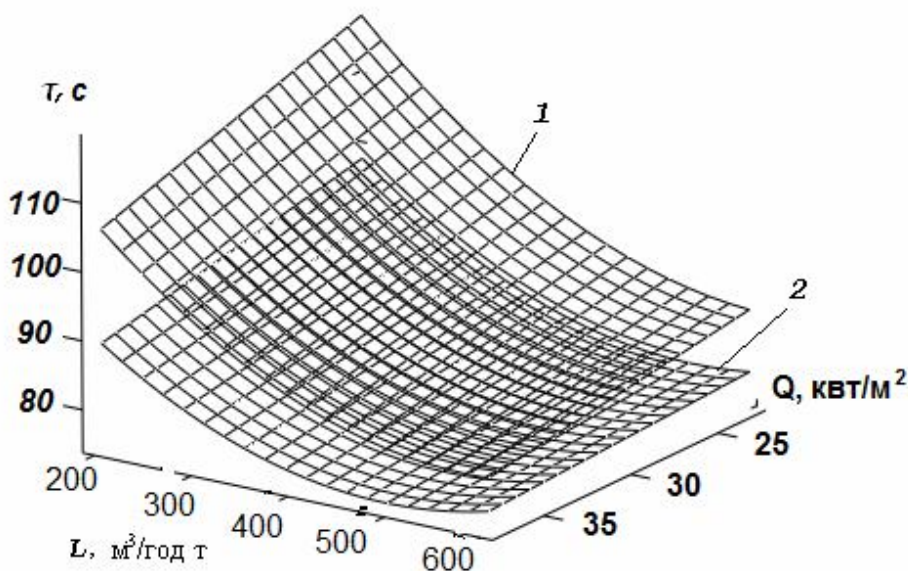


Рис. 4. Поверхні відгуку експозиції мікронізації зернового матеріалу (1– $U_0=4\text{кг/кг\%}$ , 2–  $U_0=4,6\text{кг/кг}$ )

Така схема проведення процесу також дозволяє використовувати установку і для сушіння невеликих партій зерноматеріалу. Але для такої схеми проведення процесу потрібно визначити вплив сили тиску низхідного повітряного потоку на швидкість переміщення зерноматеріалу і, відповідно, час його перебування під дією ІЧ-ламп.

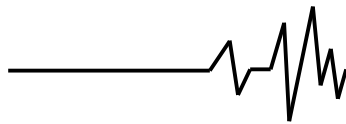
**Висновки:**

- застосування радіаційно-конвективного сушіння дозволяє проводити різні види термообробки зернових матеріалів на одній установці, що особливо актуально для невеликих господарств;

- застосування низхідного повітряного потоку повітря дозволяє підвищити ефективність термообробки зернового матеріалу за рахунок збільшення теплового напору і зменшення непродуктивних втрат теплоти.

**Список використаних джерел**

1. Котов Б.І. Математичне моделювання динамічних режимів мікронізації зерна при зміні потужності випромінювачів за координатою / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В.В. Кифяк // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Технічні науки. – 2014. Вип. 148. – С. 388–394.



2. Котов Б. І. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання / Б. І. Котов, В. В. Кіфяк, Р. А. Калініченко // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. – 2014. – Вип. 152. – С. 181–191.

3. Поперечний А.М. Кінетика процесу сушіння плодівих кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М. Поперечний, Н.О. Миронова // Вісник ХНТУСГ. – 2007. – Вип. 58. – С. 122 – 129.

4. Беляев М.И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов / М.И. Беляев, П.Л. Пахомов. – Х. ХИОП. – 1991. – 157 с.

5. Кочанов Д.С. Научное обеспечение процесса микронизации зерновых культур и разработка технологии производства комбикормов из микронизированного зерна. Автореф. дис. канд.техн. наук / Д.С. Кочанов. – ФГБОУВПО «ВГУИТ». Воронеж. – 2014. – 24 с.

6. Худоногов Е.Г. Влияние инфракрасно-конвективно-вакуумного способа сушки на содержание биологически активных веществ в лекарственном растительном сырье / Е.Г. Худоногов, И.А. Худоногов, А.М. Худоногов // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 5. С. 343–346.

#### Список джерел в транслітерації

1. Kotov B.I. Matematychni modelyuvannya dynamichnikh rezhimiv mikronizatsiyi zerna pry zmini potuzhnosti viprominyuvachiv za koordynatamy / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, V.V. Kyfyak // Visnyk KHNTUS-H imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. – 2014. Vyp. 148. – S. 388–394.

2. Kotov B. I. Matematychna model dynamichnikh rezhimiv elektrotermichnoyi ustanovky dlya obrobky zernomaterialiv impul'snimi potokamy infrachervonoho vyprominyuvannya / B. I. Kotov, V. V. Kifyak, R. A. Kalinichenko // Visnyk KHNTUS-H imeni Petra Vasylenka. – 2014. – Vyp. 152. – S. 181–191.

3. Poperechnyy A.M. Kinetika protsessu sushki plodovykh kostochek v vibrokipyashchego sloye pri infrakrasnom nagreve / A.M.

Poperechnyy, N.A. Mironova // Vestnik KHNTUSG. – 2007. – Vyp. 58. – S. 122–129.

4. Belyayev M.I. Teoreticheskiye osnovy kombinirovanykh sposobov teplovoiy obrabotki pishchevykh produktov / M.I. Belyayev, P.L. Pakhomov. – KH. KHIOF. – 1991. – 157 s.

5. Kochanov D.S. Nauchnoye obespecheniye protsessu mikronizatsiyi zernovykh kul'tur i razrabotka tekhnologii proizvodstva kombikormov iz mikronizirovanogo zerna. Avtoref. dis. kand.tekhn. nauk / D.S. Kochanov. – FGBOUVPO «VGUIT». Voronezh. – 2014. – 24 s.

6. Khudonogov Ye.G. Vliyaniye infrakrasno-konvektivno-vakuumnogo sposoba sushki na sodержaniye biologicheskii aktivnykh veshchestv v lekarstvennom rastitel'nom syrye / Ye.G. Khudonogov, I.A. Khudonogov, A.M. Khudonogov // Vestnik KrasGAU. – 2012. – № 5. S. 343–346.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ ЗЕРНА В ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

**Аннотация.** В статье рассмотрены аналитические математические модели процессов термической обработки зерновых материалов. Определены энергетические особенности термообработки зерна при различных способах подвода теплоты. Исследовано влияние нисходящего воздушного потока на характер ИК-термообработки.

**Ключевые слова:** термообработка; математическая модель, вибрационный транспортер.

#### INVESTIGATION OF RADIATION-CONVECTIVE HEAT TREATMENT OF GRAIN IN A VIBRATING-BED LAYER

**Annotation.** In the article the analytical mathematical models of processes of heat treatment of grain materials. Defined energy features of heat treatment of grain at various ways of supplying heat. The effect of the downward air flow to the nature of infrared heat-treating.

**Key words:** heat treatment, mathematical model, vibrating conveyor.