

Котов Б.І.<sup>1</sup>,  
Калініченко Р.А.<sup>2</sup>,  
Спірін А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>д-р. техн. наук, професор, Вінницький Національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

<sup>2</sup>канд. техн. наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>канд. техн. наук, доцент, Вінницький Національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ В БЕЗПЕРЕВНИХ СУШАРКАХ КОЛОНКОВОГО ТИПУ

УДК 631.334

*Післязбиральна обробка і зберігання зерна є важливим етапом в загальному процесі виробництва зерна, що дозволяє не тільки кількісно і якісно зберегти врощений урожай, але і забезпечити отримання максимального прибутку від його реалізації при найбільш вигідній кон'юнктурі ринку. Термічне сушіння забезпечує зберігання зібраного урожаю, запобігає його втратам, а також у деяких випадках підвищує якість готового продукту.*

*Необхідність інтенсифікації і автоматизації технологічних процесів післязбиральної обробки зерна потребує розвитку методів математичного моделювання енергоємних процесів термічного сушіння. Визначення і обґрунтування оптимальних режимів і параметрів роботи сушильного обладнання для забезпечення якісного сушіння можливе лише з використанням методів математичного моделювання.*

*Термічне сушіння дисперсного матеріалу описується складними математичними моделями в частинних похідних теорії тепло- і масообміну. Аналітичне рішення системи диференціальних рівнянь, що описують тепло- і масообмін в товстому шарі матеріалу при змінному режимі до цих пір не отримано, тому роботи, щодо розвитку спрощених аналітичних модельних представлень є надзвичайно актуальними, оскільки, дозволяють провести ідентифікацію взаємопов'язаних процесів тепло- і масообміну в діючих сушильних установках.*

*Відповідно метою проведених досліджень було отримання формул для спрощеного розрахунку параметрів шару зерна і теплоносія в напрямку руху в колонковій суширці.*

*Розглянуті математичні моделі нестационарного процесу сушіння дисперсного матеріалу у щільному шарі дозволяють визначати розвиток полів температури і вологовмісту в шарі дисперсного матеріалу в установках безперервної дії, що дозволяє визначати режими і параметри сушильних установок для забезпечення якісного і енергоефективного процесу.*

**Ключові слова:** тепло- і масообмін, термічне сушіння, математична модель, температурне поле, поле вологовмісту.

### Постановка проблеми

Останнім часом на вітчизняному ринку сільськогосподарської техніки все частіше з'являються зерносушарки колонкового типу [1,2]. В таких сушарках зерно гравітаційним потоком переміщується зверху до низу між двома перфорованими поверхнями де обробляється фільтруємим крізь шар сушильним та охолоджуючим агентом який подається під прямим кутом до напрямку руху матеріалу. Поверхні колонкової шахти можуть бути виконані у вигляді площинних або циліндричних стінок. Зерносушарки такого типу можуть забезпечити більш високі питомі подачі сушильного агента або повітря ніж шахтні з коробами і відповідно забезпечити більш високу питому продуктивність. Завдяки вільному переміщенню зерна знижується небезпека утворення застійних зон [2].

Основний технологічний недолік зерносушарок колонкового типу – значна нерівномірність сушіння, тобто розподілу температури і вологості матеріалу за товщиною шару (від входу сушильного агента в шар до виходу), що призводить до необхідності зменшення товщини шару зерна і відповідне зниження показників продуктивності. Тому визначення температурного і вологісного полів в об'ємі колонкової сушарки є важливою і необхідною задачею, рішення якої дозволить визначити раціональні конструктивні і технологічні параметри які забезпечують мінімальні витрати енергії і нормовану якість продукту, що висушується.

### **Аналіз досліджень і публікацій**

Конвективне сушіння зерна у щільному рухомому шарі є складним процесом одночасного перенесення теплоти і вологи, який описується складною системою диференціальних рівнянь [3,4]. Розв'язок таких рівнянь навіть у спрощеному вигляді отримано тільки на ЕОМ [5]. Аналітичний розв'язок рівнянь тільки для процесу теплообміну в шарі отримано в [6] для нерухомого шару надто складний і важко застосовуваний для практичних розрахунків. Разом з тим використання проміжних результатів отриманих розв'язків [6] і методів аналітичного хоча і наближеного теплообміну в шарі дисперсного матеріалу при фільтрації газу [7], дає можливість використати при певних припущеннях вже знайдені розв'язки нестационарного теплообміну в рухомому шарі для аналізу стаціонарних процесів в рухомому шарі і на їх основі визначити розвиток полів температури і вологовмісту в установках безперервної дії.

### **Мета роботи**

Визначення формул для спрощеного розрахунку параметрів зерна і теплоносія в напрямку руху в колонковій сушарці.

### **Результати досліджень**

Сушіння здійснюється на колонковій сушарці, де зерно рухається під дією сили тяжіння між двома вертикальними перфорованими стінками і продувається сушильним агентом спрямованим у горизонтальному напрямку. Якщо процес тепло- і масообміну розглядати як такий, що складається з окремих послідовних етапів то на кожному етапі (або ділянці сушильного тракту) має місце стаціонарний процес при перехресному русі двох потоків зерна і сушильного агента. Як показано в роботі [4] процеси стаціонарного тепло-і масообміну (які складають сутність процесу сушіння) в даному випадку будуть подібні до аналогічних нестационарних процесів у нерухомому щільному шарі дисперсного матеріалу.

Математична модель процесу сушіння дисперсних матеріалів у нерухомому щільному шарі, основана на системі диференціальних рівнянь теплового і матеріального балансів із спрощеними припущеннями наведеними в попередніх дослідженнях [3,8] може бути представлена у вигляді:

$$c_p G_v H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha f(\theta - t) \quad (1)$$

$$m_3 c_3 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - m_0 r_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = \alpha f(t - \theta) \quad (2)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k(t)(U - U_p(d)) \quad (3)$$

$$-m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} = G_v H \frac{\partial d}{\partial x} \quad (4)$$

де  $t$ ,  $d$  – температура і вологовміст сушильного агента;  $\theta$ ,  $U$  – температура і вологовміст

зернового матеріалу;  $\alpha, f$  – коефіцієнт і поверхня теплообміну матеріалу і сушильного агента;  $c_3, c_p$  – питома теплоємність зерна і сушильного агента;  $r_0$  – питома теплота випаровування вологи;  $m_3, m_0$  – маса вологого і сухого зерна;  $G_v$  – масові витрати сушильного;  $k(t)$  – коефіцієнт сушіння;  $U_p$  – рівноважний вологовміст матеріалу;  $x$  – координата в напрямку руху сушильного агента.

Система рівнянь (1-4) описує нестационарний режим сушіння зерна при стаціонарному режимі в процесі рівномірного руху зерна і сушильного агента в кожній точці двомірного простору ( $X, Y$ ) всі параметри процесу  $t, d, U, \theta$  – будуть мати постійні значення в будь-який момент часу.

Кількість змінних величин в рівнянні (2) можна зменшити використанням критерію Ребіндера, який за визначенням може бути записаний у вигляді:

$$Rb = -\frac{c_3}{r_0} \frac{d\theta}{dU}, \quad \text{або} \quad dU = -\frac{c_3}{r_0 Rb} d\theta \quad (5)$$

Тоді вихідну систему рівнянь стаціонарного процесу сушіння при перехресному русі матеріалу і сушильного агента можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = A(\theta - t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = B(t - \theta) \quad (7)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k(t)(U - bd) \quad (8)$$

$$-m_0 \partial U = m_v \partial d \quad (9)$$

де  $A = \frac{\alpha f}{c_p G_v H}$ ;  $B = \frac{\alpha f}{c'_3 G_3 L}$ ;  $c'_3 = c_3 \left(1 + \frac{1}{Rb}\right)$ .

Рівняння (6) і (7) аналогічний рівнянням [6] розв'язок яких відомий [7]. Введемо безрозмірні змінні:  $F = Ax$ ;  $Z = By$  і відносні значення температур сушильного агента:

$$\bar{t} = \frac{t_0 - t(Z, F)}{t_0 - \theta_0};$$

матеріалу:

$$\bar{\theta} = \frac{t_0 - \theta(Z, F)}{t_0 - \theta_0}.$$

Рівняння (6) і (7) приведемо до вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial t(Z, F)}{\partial F} = \theta(Z, F) - t(Z, F) \\ \frac{\partial \theta(Z, F)}{\partial Z} = t(Z, F) - \theta(Z, F) \end{cases} \quad (10)$$

При початкових умовах:  $t(0, Z) = 0$ ;  $\theta(F, 0) = 1$

Розв'язок системи рівнянь (10) можна записати [7] у вигляді:

$$\bar{\theta}(F, Z) = e^{-(F+Z)} I_0(2\sqrt{FZ}) + \int_0^F e^{-(Z+\eta)} I_0(2\sqrt{Z\eta}) d\eta \quad (11)$$

$$\bar{t}(F, Z) = \int_0^F e^{-(Z+\eta)} I_0(2\sqrt{Z\eta}) d\eta \quad (12)$$

Зміну вологовмісту матеріалу в напрямку руху визначимо з рівняння (8).

Прийmemo в першому наближенні лінійну залежність коефіцієнта сушіння від температури теплоносія:

$$K_c(t) = at(Z, F) + c \quad (13)$$

Величину поточного вологовмісту сушильного агента визначимо інтегруванням рівняння (9) в межах: від  $U_0$  до  $U$  і від  $d_0$  до  $d$ .

$$d - d_0 = \frac{m_0}{m_v} (U_0 - U) \quad (14)$$

звідки:  $d = R_1 - RU$ ;

$$R_1 = d_0 + \frac{m_0}{m_v} U_0; \quad R = \frac{m_0}{m_v}$$

$$U_p = b(R_1 - RU) \quad (15)$$

Підставляючи отримані значення  $K_c(\theta)$  і  $U_p$  із (13) і (15) в рівняння (8) матимемо:

$$\frac{dU}{d\tau} = [c + at(x, y)](n - mU); \quad (16)$$

$$m = 1 + b \frac{m_0}{m_v}; \quad n = b \left( d_0 + \frac{m_0}{m_v} U_0 \right)$$

або поділяючи змінні:

$$\frac{dU}{n - mU} = cd\tau + at(x, y)\tau \quad (17)$$

Вираз для залежності  $t(x, y)$  з рівняння (12) отримаємо у вигляді:

$$t(x, y) = t_0 - \Delta T_0 \left[ \int_0^F e^{-(Z+\eta)} I_0(2\sqrt{Z\eta}) d\eta \right] \quad (18)$$

де  $\Delta T_0 = t_0 - \theta_0$ .

Інтеграл, що входить до формул (11), (12), (17) може бути обрахований чисельно на ПК, або аналітично за допомогою розкладання функції Беселя в ряд [7].

Для більш наближеної оцінки розподіленості параметрів процесу в стаціонарному режимі функціонування сушильної установки, можливо (із незначним завищенням результатів) обмежитися одним першим членом ряду, тобто прийняти:  $I_0(2\sqrt{BAyx}) \approx 1$  в цьому випадку поля температур і вологовмісту в рухомому шарі зерна визначаються наступними формулами:

$$\theta(x, y) = t_0 - \Delta T_0 [e^{-(Ax+By)} - e^{-By} (1 + e^{-Ax})] \quad (19)$$

$$t(x, y) = t_0 - \Delta T_0 e^{-Ax-By} (e^{-Ax} - 1) \quad (20)$$

На рис.1. представлене температурне поле сушильного агента визначене за формулами (12) і (20), різниця в результатах прийнятна для подальшого використання спрощеної залежності (20).

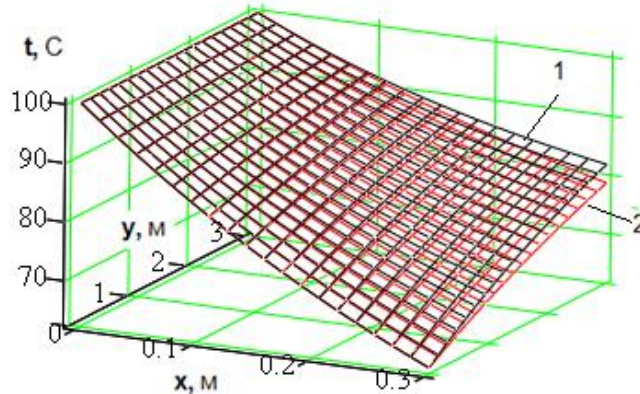


Рис.1. Температурне поле сушильного агента в робочій зоні колонкової сушарки (1 – визначене за залежністю (12), 2 – за (20))

Для визначення вологовмісту замінимо координати  $x = v_v \tau$ ,  $y = v_3 \tau$  у формулі (20), де  $v_v, v_3$  – швидкість сушильного агента, зерна,  $\tau$  – поточний час і підставивши її в (17), проінтегрувавши отримаємо:

$$U(x, y) = \frac{n}{m} + \exp\left( m e^{-(Ax+2By)} \left[ \frac{a e^{By} \Delta T_0}{A v_v + B v_3} - \frac{e^{Ax+By} (a \Delta T_0 + B e^{By} (c + a t_0) y)}{B v_3} \right] \cdot C \right) \quad (21)$$

де  $C$  – постійна інтегрування.

При записі залежності (21) здійснений зворотний перехід після інтегрування до координат  $x, y$ .

Постійну інтегрування  $C$  знайдемо з умови  $U(x, 0) = U_0$ , тоді:

$$C(x) = \exp\left( -m e^{-Ax} \left( \frac{-a e^{Ax} \Delta T_0}{B v_3} + \frac{a \Delta T_0}{A v_v + B v_3} \right) \right) \left( U_0 - \frac{m}{n} \right) \quad (22)$$

На рис.2 представлено поле вологовмісту зернового матеріалу в колонці сушарки, отримане за залежністю (21) з урахуванням (22).

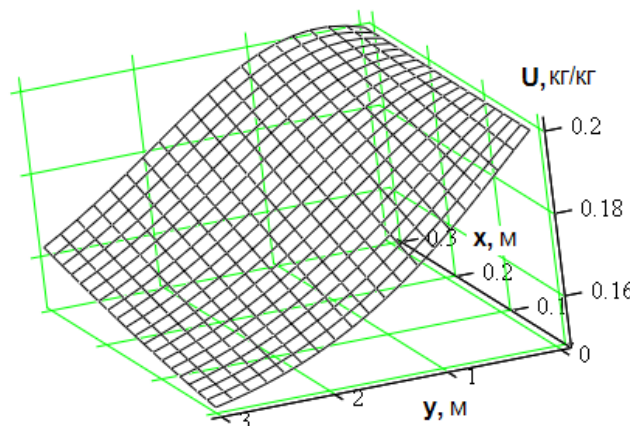


Рис.2. Поле вологовмісту зернового матеріалу в колонці сушарки.

### Висновки

Отримано аналітичні залежності для наближеного розрахунку рівномірного розподілу температури і вологості матеріалу в шарі рухомого дисперсного матеріалу.

### Література.

1. Машины, агрегаты та комплексы для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур / Колектив авторів за ред. В. І. Кравчук. – Дослідницьке: УкрНДІПВТ, 2011. – 224 с.
2. Гапонюк І. О. Вітчизняні зерносушарки: стан та перспективи / І. О. Гапонюк. // Хранение и переработка зерна. – 2014. – №2. – С. 25–29.
3. Котов Б. І. Тепло- і масообмін при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів / Б. І. Котов, А. В. Спирін, Р. А. Калініченко. // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – №2. – С. 24–28.
4. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
5. Анискин В. И. Моделирование процесса низкотемпературной сушки в слое с помощью ЭВМ / В. И. Анискин, Г. С. Окунь, И. И. Вертцман. // Научные труды ВИМ. – 1987. – №115. – С. 42–47.
6. Лобанов И. Е. Точное аналитическое решение задачи о полном распределении температур вплоть до концов регенератора с высокотеплопроводной насадкой с произвольно распределённой начальной температурой (задача Анцелиуса-Нуссельта) и его следствия / И. Е. Лобанов. // Альманах современной науки и образования. – 2009. – №12.ч.1. – С. 54–66.
7. Гольдфарб Э. М. Теплотехника металлургических процессов / Э. М. Гольдфарб. – М.: Металлургия, 1967. – 440 с.
8. Котов Б. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, М. І. Липунов. // Конструювання виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2012. – №42. – С. 340–346.

### Summary

**B. Kotov, R. Kalinichenko, A. Spirin** Simulation mode drying of dispersed materials in a continuous dryers kolinsky type

*Post-harvest handling and storage of grain is an important step in the overall process of production of grain and not only quantitatively and qualitatively preserve their harvest, but also to ensure maximum profit from its sale at the most favorable market conditions. Thermal drying provides harvest storage, prevent its loss, and in some cases improves the quality of the finished product.*

*The need for intensification and automation of technological processes of postharvest processing of grain requires the development of methods of mathematical modeling of processes of energy-intensive thermal drying. Determination and substantiation of optimum modes and parameters of the drying equipment to ensure the quality of drying is only possible with the use of mathematical modeling techniques.*

*Heat drying is described by complex mathematical models of partial theory of heat and mass transfer. The analytical solution of the system of differential equations describing the heat*

*and mass transfer in a thick layer of material at a still alternating mode is not received, so the work on the development of simplified analytical model concepts are extremely important because they allow the identification of interrelated heat and mass transfer in existing dryers .*

*The aim of the research was to obtain formulas for the simplified design of the grain layer parameters and coolant in the direction of movement in the core dryer.*

*The mathematical model of the non-stationary process of drying of the particulate material in a dense layer allow you to define the development of temperature and moisture fields in the layer of particulate material in a continuous settings that allows you to define the parameters and modes of drying facilities to ensure quality and energy-efficient process.*

**Keywords:** *heat and mass transfer, thermal drying, mathematical model, temperature field, the field moisture content.*

### **References**

1. Machines, machines and systems for post-harvest processing and storage of cereals / Authors Ed. V. Kravchuk. - Research: UkrNDIPVT, 2011. - 224 p.
2. Haponyuk I.O. Domestic dryers: Status and Prospects / IO Haponyuk. // REFINING storage and grain. - 2014. - №2. - P. 25-29.
3. Kotov B.I. Heat and mass transfer in drying agricultural plant materials / BI Kotov, AV Spirin, RA Kalinichenko. // Engineering, energy, transport AIC. - 2016. - №2. - P. 24-28.
4. Frolov V.F. Modeling drying dispersive materials / VF Frolov. - L.: Chemistry, 1987. - 208 p.
5. Anyskyn V.I. Modeling nyzkotemperaturnoy drying process with a sloe in moschyu computers / VI Anyskyn, GS perch, I. I. Verttsman. // Proceedings Nauchnye OFF. - 1987. - №115. - P. 42-47.
6. E. I. Lobanov Tochnoe analytycheskoe decision problem is full of apportionment of the temperature vplot to Kontsovo regenerator with vysokoteploprovodnoy nasadkoy with pro-yzvolno raspredel'ennoy primary temperaturoy (Antselyusa-Nusselt problem) and ego consequence / E. I. Lobanov. // Almanac of Modern Science and Education. - 2009. - №12.ch.1. - P. 54-66.
7. Goldfarb E. M. Teplotehnyka metallurgical processes / E. M. Goldfarb. - M.: Metallurgy, 1967. - 440 p.
8. Kotov B.I. analytical determination of dynamic thermal and humidity regime zernosu-Sharok continuous / BI Kotov, RA Kalinichenko, MI Lypunov. // Construct-ing production and operation of agricultural machinery. - 2012. - №42. - S. 340-346.