

УДК 631.365.22

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

*Ящук А. А*

*Кірчук Р. В*

*Луцький національний технічний університет*

*В статті представлено модель, що описує процес сушіння щільного шару насіння льону олійного, який розглядається як сукупність тонких шарів.*

*Simulation of drying of a flaxseed layer. The model that describes a process of drying of thick layer of flaxseed that considered as a set of thin layers is submitted in the article.*

### **Постановка проблеми**

Насіння льону олійного характеризується малими розмірами, що робить його чутливим до температурного режиму сушіння, а незначне перевищення допустимих максимальних температур нагрівання насіння зумовлює втрату його якості [1]. Моделювання процесу сушіння насіння льону олійного дозволить визначити раціональні режими сушіння, виходячи з параметрів сушильного агента та матеріалу за всією глибиною шару, встановити необхідну тривалість сушіння для заданих умов, зменшити втрати енергії і запобігти зниженню якості матеріалу.

### **Аналіз досліджень**

В дослідженнях процесу сушіння рослинних матеріалів великий внесок зробили Ликов А.В., Зеленко В.І., Котов Б. І. та багато інших. Серед досліджень, що присвячені збиранню і післязбиральному обробітку льону можна виділити роботи Гінзбурга Л. Н., Живетина В. В., Дідуха В. Ф. та інших.

### **Формулювання мети**

Метою роботи є створення моделі процесу сушіння насіння льону олійного, що описує зміну параметрів сушильного агента та стан матеріалу за усією глибиною шару в процесі сушіння, що дасть можливість встановити найбільш раціональні режимні параметри сушіння, залежно від початкових параметрів матеріалу.

### **Виклад основного матеріалу**

Основними параметрами, що характеризують матеріал в процесі сушіння є його вологість  $u$ , температура  $\theta$ , а параметрами сушильного агента - вологовміст  $d$  і температура  $t$ . На процес сушіння також впливають властивості матеріалу, зокрема питома теплоємність  $c_m$ , шпаруватість  $\xi$  та ін.

Розглянемо шар матеріалу товщиною  $H$  (рис.1) як сукупність  $n$  тонких шарів з

однаковою товщиною  $h$ :  $H = \sum_{i=1}^n h_i$ , а загальний час сушіння  $\tau$  як послідовність однакових коротких проміжків часу  $\Delta\tau$ :  $\tau = \sum_{j=1}^m \Delta\tau_j$ .

Оскільки, товщина  $i$ -го тонкого шару незначна, то приймаємо, що вологість  $u_i$  і температура  $\theta_i$  є незмінними за його об'ємом.

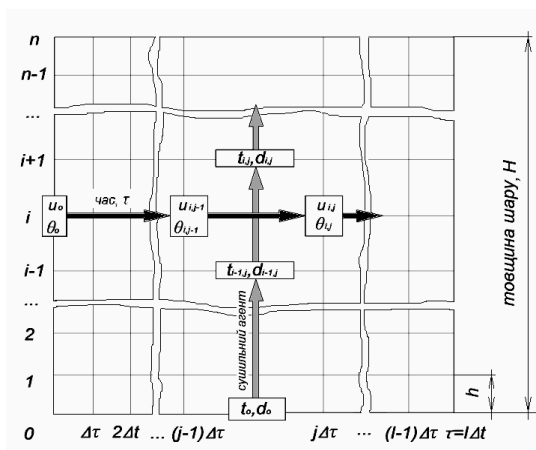


Рис. 1. Параметри сушіння

Параметри  $d_{i,j}$  і  $t_{i,j}$  на виході з кожного  $i$ -го тонкого шару є початковими для кожного наступного  $i+1$  тонкого шару. Вологість  $u_{i,j}$  і температура  $\theta_{i,j}$  матеріалу в кожному  $i$ -му тонкому шарі в кінці короткого проміжку часу  $\Delta\tau_j$  є початковими для початку кожного наступного короткого проміжку часу  $\Delta\tau_{j+1}$ .

Для опису зміни вологості матеріалу з часом використовуємо залежність Гендерсона-Пабіса [4]:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j), \quad (1)$$

де  $MR$  – коефіцієнт, що характеризує зниження вологості матеріалу відносно початкової під час сушіння і визначається за залежністю (2);

$a, k$  – невідомі коефіцієнти, що визначаються властивостями конкретного матеріалу і режимами сушіння;

$\tau_j$  – тривалість сушіння, хв.

$$MR = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}, \quad (2)$$

де  $u_0$  – початкова абсолютна вологість матеріалу, %;

$u$  – абсолютна вологість матеріалу через час  $\tau_j$  від початку сушіння, %.

$u_p$  – рівноважна вологість матеріалу, %.

Прирівнявши праву частину виразів (1) і (2) встановимо вологість  $i$ -го тонкого шару насіння льону олійного. В цьому шарі матеріалу через час сушіння  $\tau_j = \Delta\tau \cdot j$  вологість матеріалу становитиме

$$u_{i,j} = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j) \cdot (u_0 - u_p) + u_p, \quad (3)$$

З застосуванням методів математичної статистики встановлено закономірності між визначеними за результатами експериментальних досліджень [5] кінетики сушіння насіння льону олійного значеннями коефіцієнтів  $a$  і  $k$  та швидкістю  $v$  і температурою  $t$  сушильного

агента:

$$a = 1,347708 - 0,168 \cdot v - 0,006387 \cdot t_{i,j} + 0,061 \cdot v^2, \quad (4)$$

$$k = 0,179083 - 0,10775 \cdot v - 0,004767 \cdot t_{i,j} + 0,0435 \cdot v^2 + 0,000063 \cdot t_{i,j}^2. \quad (5)$$

Рівноважна вологість льону визначимо з рівняння Гендерсона [4]:

$$u_p = \left( -\frac{\ln(1-\varphi)}{1,76 \cdot 10^{-4} \cdot (\theta_{i,j-1} + 56,228)} \right)^{0,525}, \quad (7)$$

де  $\varphi$  – відносна вологість повітря (сушильного агента).

Вологість сушильного агента [6]

$$\varphi = \frac{745 \cdot d_{i,j}}{(622 + d_{i,j}) \cdot 10^{0,622 + 7,5 \cdot t_{i,j} / (238 + t_{i,j})}}. \quad (8)$$

В період постійної швидкості сушіння температура матеріалу близька до температури мокрого термометра  $\theta_{m.m.}$  [2]. Цей період триває до досягнення матеріалом критичної вологості, яку для насіння олійних культур залежно від вмісту олії  $M_{ол}$  можна визначити за формулою [6]:

$$u_{кр} = 14,5 \cdot \frac{100 - M_{ол}}{100}. \quad (9)$$

Температуру  $i$ -го тонкого шару  $\theta_{i,j}$  в період падаючої швидкості сушіння після часу сушіння  $\tau_j = \Delta\tau \cdot j$  при температурі сушильного агента на вході в цей шар  $t_{i-1,j}$  і відносній вологості  $u_{i,j}$  визначатимемо з залежності [2]:

$$\theta_{i,j} = t_{i-1,j} - b \cdot (u_{i,j} - u_p) \quad (10)$$

де  $b$  – коефіцієнт, встановлений з температурних кривих кінетики сушіння на основі експериментальних досліджень ( $b=1,9 \dots 2,2$ ).

Вологовміст сушильного агента на вході в  $i$ -ий тонкий шар матеріалу

$$d_{i-1} = m_{напу} / m_{с.н.}, \quad (11)$$

де  $m_{напу}$  – маса пари, г;

$m_{с.н.}$  – маса сухого сушильного агента, кг.

При зміні вологості цього шару матеріалу на  $\Delta u = u_{i,j-1} - u_{i,j}$  він втратить вологу масою  $m_{вип.}$ , а вологовміст сушильного агента на виході з цього шару

$$d_i = (m_{напу} + m_{вип.}) / m_{с.н.} \quad (12)$$

Шпаруватість як відношення об'єму пор  $v_{пор}$  до об'єму матеріалу  $v_{мат.}$

$$\xi = v_{пор} / v_{мат.} \quad (13)$$

Об'єм пор матеріалу рівний об'єму сушильного агента, що заповнює ці пори. Маса сухого повітря в обмеженій ділянці тонкого шару матеріалу товщиною  $h$  і площею  $s$  становитиме

$$m_{с.н.} = \rho_{с.н.} \cdot \xi \cdot s \cdot h, \quad (14)$$

При зниженні абсолютної вологості від  $u_{i,j-1}$  до  $u_{i,j}$  маса випаруваної вологи

$$m_{вип.} = m_{вол.i,j-1} - m_{вол.i,j} = \frac{u_{i,j-1} - u_{i,j}}{100} \cdot m_{сух.част.} \quad (15)$$

де  $m_{вол.i,j,j-1}$  – маса вологи в  $i$ -му тонкому шарі матеріалу на початку і в кінці короткого періоду часу  $\Delta\tau_j$ , г;

$m_{\text{сух.част.}}$  – загальна маса матеріалу без вологи, г.

Маса сухої частини матеріалу з відомим об'ємом  $V$

$$m_{\text{сух.част.}} = \frac{\rho_{\text{мат.}} \cdot V}{1 + 0,01 \cdot u_{i,j-1}}, \quad (16)$$

де  $\rho_{\text{мат.}}$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм тонкого шару матеріалу, м<sup>3</sup>.  $V = h \cdot S$ ;

Вологовміст сушильного агента, що омиває  $i$ -й тонкий шар матеріалу

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + 0,001 \cdot \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат.}}}{(100 + u_{i,j-1}) \cdot \rho_{\text{с.н.}} \cdot \xi}. \quad (17)$$

Знайдемо теплоту сушильного агента, що затрачається на нагрівання матеріалу і випаровування вологи [8]. В  $i$ -му тонкому шарі за короткий проміжок часу  $\Delta\tau_j$

$$Q_{i,j} = G \cdot c_{\text{мат.}} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + W_{i,j} \cdot (H_{ni,j} - H_{pi,j}). \quad (18)$$

де  $G$  – продуктивність, кг/год,  $V$  перерахунку на тонкий шар матеріалу в короткий проміжок часу  $G = h \cdot S \cdot \rho / \Delta\tau$ ;

$c_{\text{мат.}}$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);

$W_{i,j}$  – втрата вологи, що виділяється з матеріалу в процесі сушіння, кг

$H_{ni,j}$  і  $H_{pi,j}$  – відповідно ентальпія пари і рідини, кДж/кг, ( $H_n = 2500 + 1,842 \cdot t_{i-1,j}$ ,  $H_p = 4,19 \cdot \theta_{i,j}$ ), [8].

Втрата вологи: 
$$W_{i,j} = G \cdot \frac{u_{i,j-1} - u_{i,j}}{100 - u_{i,j}} \quad (19)$$

Температуру сушильного агента на виході з  $i$ -го тонкого шару матеріалу знайдемо з формули:

$$Q_{i,j} = L_{i,j} \cdot (1 + d_{i,j}) \cdot c_{\text{нов.}} \cdot (t_{i,j-1} - t_{i,j}), \quad (20)$$

де  $c_{\text{нов.}}$  – питома теплоємність повітря, кДж/(кг·К);

$L_{i,j}$  – витрата сухого повітря, кг.

$$L_{i,j} = W_{i,j} / (d_{i,j} - d_{i,j-1}). \quad (21)$$

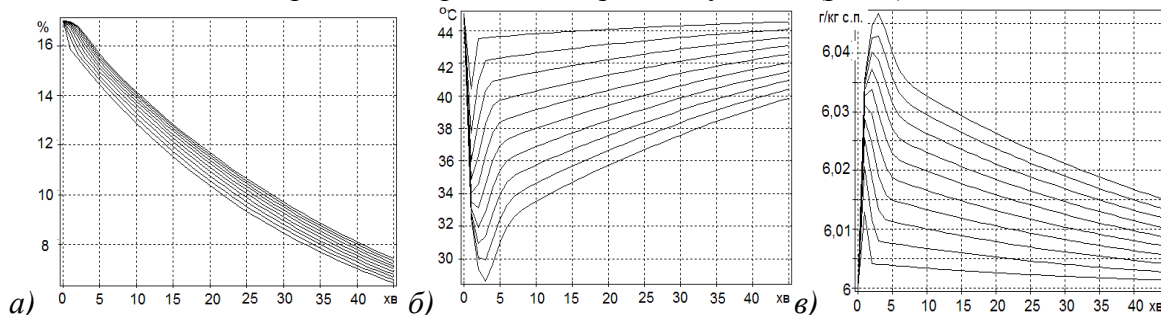
Підставивши в (20) залежність (18), (19), (21), а також  $H_{ni,j}$  і  $H_{pi,j}$ , визначимо температуру с.а. на виході з  $i$ -го тонкого шару матеріалу

$$t_{i,j} = t_{i-1,j} - \frac{c_{\text{мат.}} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot (H_{ni,j} - H_{pi,j}) \cdot (d_{i,j} - d_{i,j-1})}{c_{\text{нов.}} \cdot (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot (1 + d_{i,j})} \quad (22)$$

Таким чином розрахунок процесу сушіння шару насіння льону олійного зводиться до послідовного розрахунку параметрів  $u$ ,  $\theta$ ,  $d$  і  $t$  для кожного тонкого шару матеріалу вкінці кожного короткого проміжку часу, тривалістю  $\Delta\tau$ , з врахуванням рівноважної вологості насіння льону олійного  $u_p$ , швидкості сушильного агента  $v_{\text{с.а.}}$ , а також фізико-механічних властивостей матеріалу.

Вихідними даними для розрахунку в кожному  $i$ -му тонкому шарі в проміжок часу  $\Delta\tau_j$  є вологість  $u_{i,j-1}$  і температура  $\theta_{i,j-1}$  матеріалу в кінці попереднього проміжку часу  $\Delta\tau_{j-1}$ , а також вологовміст  $d_{i-1,j}$  і температура  $t_{i-1,j}$  сушильного агента на виході з попереднього шару.

Розрахунок було проведено з застосуванням ПЕОМ на комп'ютерній програмі, розробленій за допомогою Free Pascal Lazarus. Одержано графіки зміни вологості тонких шарів насіння льону олійного (товщиною 3 мм), температури, а також вологовмісту сушильного агента, що проходить крізь них в процесі сушіння (рис.2).



**Рис. 2. Результати розрахунку процесу сушіння шару насіння льону олійного початковою вологістю 17%, зі швидкістю сушильного агента 1,5 м/с і його температурою на вході в матеріал 45°C:**

**а) абсолютна вологість тонких шарів матеріалу; б) температура сушильного агента; в) вологовміст сушильного агента**

### Висновки

Запропонована модель, що описує процес конвективного сушіння шару насіння льону олійного, який розглянуто як сукупність тонких елементарних шарів, а тривалість періоду сушіння – як сукупність коротких проміжків часу, згідно з запропонованою моделлю в результаті розрахунку одержано графіки зміни вологості за глибиною шару матеріалу, а також вологовмісту і температури сушильного агента, який проходить крізь цей шар. Запропонована модель дозволяє оцінити вплив початкових параметрів матеріалу і режимів сушіння на процес сушіння насіння льону олійного, а також встановити тривалість сушіння до досягнення потрібної вологості.

### Література

1. Санін А. А. *Технологія возделывання льна масличного в зоні Середнього Поволж'я. Рекомендації* / А. А. Санін, Л. А. Косых – Кинель, 2006.
2. Лыков А. В. *Теория сушки* / А. В. Лыков – М.: «Энергия», 1968. – 472 с., ил.
3. Котов Б. И. *Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: Дис...д-ра техн. наук: 05.20.01 / УААН, Ин-т механизации и электрификации с.х.* / Борис Иванович Котов. – Глевах, 1994. – 440 с.
4. Mujumdar M. S. (ed.) - *Handbook of Industrial Drying (third ed)*, 2006.
5. Яцук А. А. *Дослідження кінетики сушіння насіння льону олійного з розробкою конструкції сушарки* / А. А. Яцук, Р. В. Кірчук // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник – Кіровоград, 2011 – Т1, Вип. 41.*
6. *Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя.* – М., 1985.
7. Ворошилов А. И. *Исследование процесса сушки мелких семян масличных культур и обоснование схемы сушильной установки: автореф. дис. на соискание наук. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.01 „Механизация сельскохозяйственного производства“* / А. И. Ворошилов. — М., 1977. — 20 с.
8. *Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна* / Н. И. Малин. — М.: Колос, 2004. — 240 с.