

УДК 631.365.2:633.853.494

© В.О. Хвесик

Любешівський технічний коледж Луцького національного технічного університету

Р.В. Кірчук к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ НАСІННЯ РІПАКУ**

*У статті проведено огляд існуючих методів сушіння насіння ріпаку. Представлено математичну модель, що описує процес сушіння і дає змогу вибрати параметри процесу. Запропоновано ряд заходів для зменшення енергетичних витрат на процес сушіння.*

### **МОДЕЛЬ, СУШІННЯ, РІПАК, НАСІННЯ, ЕНЕРГІЯ, МЕТОД.**

**Постановка проблеми.** Післязбиральний обробіток ріпаку є енергозатратним процесом. Більша частина затрат йде на реалізацію процесу сушіння матеріалу [1,2,3].

Якщо вологість насіння ріпаку перевищує 13%, то його слід досушувати. Температурний режим сушіння вибирають, виходячи з рівня вологості й призначення зерна та конструкції сушарки. Товарний ріпак (продовольче, кормове й технічне зерно) за вологості до 19% рекомендується висушувати в шахтних прямоточних сушарках за температури теплоносія 100...120°C та нагрівання зерна до 55°C. За вищої вологості температуру теплоносія знижують на 10...20°C, нагрівання зерна - на 5...10°C. Насінневий ріпак за потреби висушують, знижуючи температуру залежно від вологості при збиранні.

Порівняно невеликі обсяги ріпаку можна висушити в підлогово-стелажних сушарках, обладнаних повітропідігрівачами чи теплогенераторами. В цих сушарках сушіння здійснюється в нерухомому шарі, тому температура теплоносія має бути 40...50°C, а нагрівання зерна – не вище 30...35°C залежно від його вологості.

У господарствах, де немає сушарок, насіння сушать у сонячну погоду на майданчиках, шаром завтовшки 5–10 см за частого перемішування. Та цей спосіб надто ризикований і тривалий, тож доцільніше застосовувати сушарки [4].

Все це обумовлює складність вибору раціональних режимних параметрів сушіння та вибір необхідного обладнання.

Тому розробка математичної моделі з можливістю подальшої оптимізації параметрів процесу сушіння є актуальним завданням, що потребує дослідження.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідженням засобів та методів сушіння сільськогосподарських матеріалів займалися вітчизняні та закордонні науковці [5,6,7,8]. Основна увага приділялася зерновим, льону та інших традиційним сільськогосподарським культурам.

Процес сушіння прийнято характеризувати трьома типовими кривими: сушіння (відносної вологості  $W$ ), температури  $\theta$  й швидкості сушіння  $\frac{dW}{dt}$ .

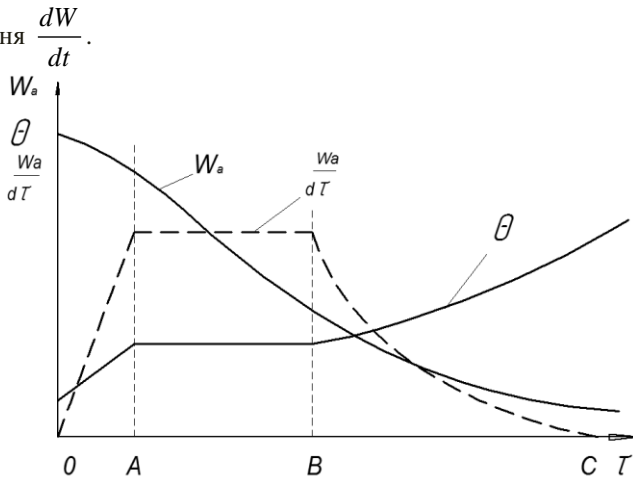


Рис.1 – Криві сушіння рослинних матеріалів

Час сушіння можна розділити на три періоди:  $OA$ ,  $AB$  і  $BC$ . У період  $OA$  матеріал прогрівається, з його поверхні випаровується волога, температура його швидко зростає до температури мокрого термометра (температура випаровування рідини), а швидкість сушіння зростає і досягає максимального значення. Період  $AB$  характеризується сталою швидкістю сушіння, вологість  $W$  при цьому спадає по прямій, а температура  $\theta$  не змінюється і залишається на рівні температури мокрого термометра; волога випаровується з поверхні матеріалу й уся теплота витрачається на це випаровування; матеріал при цьому не нагрівається, відбувається також міграція вологи з внутрішніх шарів матеріалу до поверхні. У період  $BC$  швидкість сушіння швидко спадає, вологість матеріалу  $W$  зменшується й наближається до рівноважної вологості  $W_p$ , а температура матеріалу – до температури агента сушіння. В цей період зона випаровування вологи поширюється в середину матеріалу, при досягненні матеріалом рівноважної вологості швидкість сушіння стає такою, що дорівнює нулю [9].

Теоретичний опис конвективного сушіння сільськогосподарських матеріалів можна здійснити шляхом складання рівнянь тепло- і масоперенесення.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = - \frac{g_m \cdot c_m}{g_n \cdot c_n} \cdot \frac{\partial q}{e \cdot \partial t} - \frac{g_m \cdot r'}{g_e \cdot c_n \cdot e} \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot \frac{I}{100}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{g_m \cdot e}{g_e \cdot c_n \cdot e} \cdot \left( \frac{\partial d}{\partial t} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{a_q \cdot g_m}{g_e \cdot c_n \cdot e} \cdot (t - q); \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - K \cdot (W - W_p), \quad (4)$$

де  $t$  – температура сушильного агента °C;  $d$  – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря;  $W$  – вологість матеріалу, %;  $\theta$  – температура матеріалу °C;  $V$  – швидкість сушильного агента, м/с;  $C_m, C_n$  – теплоємність матеріалу і повітря, кДж/кг °C;  $e$  – пористість шару матеріалу;  $r'$  – прихована теплота пароутворення води, кДж/кг;  $\alpha_q$  – коефіцієнт тепловіддачі, ккал/кг·год, °C;  $\gamma_m$  – об'ємна маса матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_n$  – питома вага повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $K$  – коефіцієнт сушіння, год<sup>-1</sup>;  $W_p$  – рівноважна вологість матеріалу %;  $x$  – просторова координата, м;  $\tau$  – час, год.

Перше рівняння описує закон збереження енергії в процесі сушіння, друге - закон збереження речовини, два останні відповідно закон тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Такий метод є складним і не дає можливості використовувати результати при інженерних розрахунках елементів сушарок та вдосконаленні методів сушіння.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є побудова математичної моделі сушіння насіння ріпки з метою вибору раціональних параметрів процесу, що дозволить зменшити енерговитрати загалом.

**Результати дослідження.** На основі рівнянь (1-4) спрощений розрахунок процесу сушіння тонкого шару матеріалу можна представити у вигляді алгебраїчних рівнянь:

$$\Delta t + \frac{C_m \cdot \gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} \cdot \frac{\Delta \Theta}{\Delta \tau} = \frac{\gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot \frac{r'}{100}; \quad (5)$$

$$\Delta d = - \frac{10 \gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}; \quad (6)$$

$$\Delta t = -\alpha_q \cdot \frac{\gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_n \cdot C_n} (\Theta - t); \quad (7)$$

$$\Delta W = -K \cdot (W - W_p) \Delta \tau, \quad (8)$$

де  $\delta$  – товщина тонкого шару, м.

Тонким вважається шар матеріалу, по висоті якого неоднаковістю вологи і температури можна знехтувати. При розрахунку за товщину тонкого шару прийнято середній діаметр однієї насінини ріпаку.

Коефіцієнт сушіння  $K$  [9] залежить від властивостей сільськогосподарських матеріалів та режиму сушіння.

Для тонкого шару матеріалу його температура і температура сушильного агента зв'язані співвідношенням:

$$\Theta = (t_{i-1} + t_i) / 2, \quad (9)$$

де  $t_{i-1}$ ,  $t_i$  – температура сушильного агента на вході в  $i$ -й шар і виході з нього, °С.

Таким чином, для  $i$ -го тонкого шару в інтервалі часу  $(j-1) \cdot \Delta \tau - j \cdot \Delta \tau$  розв'язок рівнянь (5)...(8) для початкових у момент часу  $(j-1) \cdot \Delta \tau$  параметрів матеріалу: вологості  $W_{i,j-1}$  і температури  $\theta_{i,j-1}$ , а також параметрів сушильного агента на вході в  $i$ -й шар (температура  $t_{i-1,j}$ , вологовміст  $d_{i-1,j}$ ) визначає параметри сушильного агента на виході з цього шару і матеріалу в момент часу  $j \cdot \Delta \tau$ :

$$t_{i,j} = (1 - A) t_{i-1,j} + A \cdot \Theta_{i,j-1} - B \cdot K (W_{i,j-1} - W_p) \cdot \Delta \tau; \quad (10)$$

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} - \frac{K}{10,2} (W_{i,j-1} - W_p); \quad (11)$$

$$W_{i,j} = W_{i,j-1} - K (W_{i,j-1} - W_p) \cdot \Delta \tau; \quad (12)$$

$$\Theta = (t_{i-1,j} + t_{i,j}) / 2, \quad (13)$$

де  $A = \frac{C_M}{102 \cdot C_n \cdot \Delta \tau + 0,5 \cdot C_M}$ ;  $B = \frac{0,01 \cdot r'}{102 \cdot C_n \cdot \Delta \tau + 0,5 \cdot C_M}$ .

Рівноважна вологість матеріалу  $W_p$  залежить від властивостей матеріалу і змінюється залежно від температури і відносної вологості повітря, в якому перебуває. Для різних сільськогосподарських матеріалів існують складні нелінійні залежності рівноважної вологості від відносної вологості атмосферного повітря непостійні для різних температур. Графічно ці залежності мають форму кривих гістерезису, і залежно від напрямку переміщення вологи між матеріалом і повітрям називаються кривими сорбції/десорбції. Існує ряд експериментально встановлених залежностей, які виражають співвідношення рівноважної

вологості матеріалу і відносної вологості оточуючого повітря, при заданій температурі.

Для визначення рівноважної вологості насіння ріпаку доцільно використати рівняння Halsey [10, 11]:

$$r.h. = e^{-e^{(C_1+C_2 \cdot T)W_p^{C_3}}}, \quad (14)$$

де  $r.h.$  – відносна вологість повітря, якій відповідає певна рівноважна вологість;  $T$  – температура, °C;  $W_p$  – рівноважна вологість матеріалу, %;  $C_1, C_2, C_3$ , – коефіцієнти рівняння, які залежать від матеріалу.

Для насіння ріпаку:  $C_1=2,8989$ ,  $C_2=-1,4596 \times 10^{-2}$ ,  $C_3=1,5454$ .

Підставивши значення  $C_1, C_2, C_3$  рівноважна вологість ріпаку визначається за формулою:

$$W_p = \left( -\frac{e^{(2,8989-1,4596 \cdot 10^{-2} \cdot T)}}{\ln(r.h.)} \right)^{0,647}.$$

Питома теплоємність насіння ріпаку залежить від його відносної вологості і наближено виражається залежністю [12]:

$$C_p = 1,2447 + 3,3076W, \quad (15)$$

де  $W$  – відносна вологість насіння ріпаку.

Отже, знаючи початкові параметри сушильного агента (вологоміст і температура на вході в матеріал) і матеріалу (температура і відносна вологість), вищезазначені залежності для тонких шарів матеріалу за короткі проміжки часу описують процес конвективного сушіння щільного шару матеріалу.

Щільний шар матеріалу певної товщини складається з тонких шарів. Їх кількість визначається виходячи з товщини тонкого шару:

$$n_p = \frac{H}{\delta}. \quad (16)$$

де  $H$  – товщина щільного шару матеріалу, м;  $\delta$  – товщина тонкого шару матеріалу, м.

Вихідними даними для розрахунку є початкова вологість  $W_0$  і температура матеріалу  $\theta$ , висота його шару  $H$  і товщина тонкого шару  $\delta$ , задана кінцева вологість  $W_k$ , вологоміст  $d$ , температура  $t$  і швидкість руху сушильного агента  $V$ .

Описаний метод розрахунку потребує великого об'єму обчислювальних робіт, тому числовий експеримент проводився з використанням ЕОМ. Розрахунок процесу сушіння щільного шару насіння ріпаку ступінчастим методом здійснюється за алгоритмом, зображеним на рис. 2, і являє собою послідовний в часі і просторі

розрахунок процесу сушіння тонких шарів матеріалу, в межах яких вологість і температуру можна вважати постійними по їх об'єму.

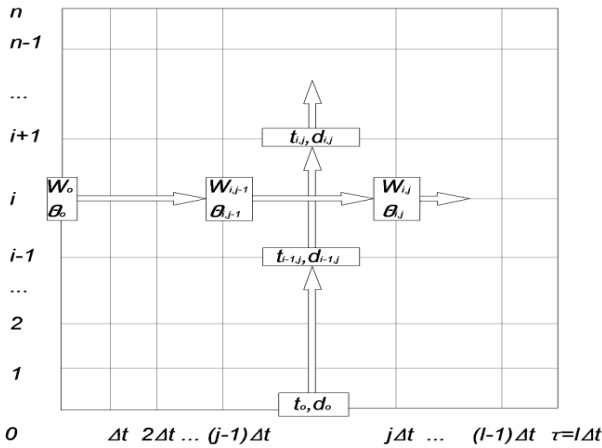


Рис. 2 – Алгоритм розрахунку процесу сушіння ступінчастим методом

Розрахунок проводиться для кожного тонкого шару матеріалу в короткі інтервали часу, протягом яких швидкість сушіння змінюється несуттєво. Отримані значення вологості і температури шару матеріалу та вологовмісту і температури СА є вихідними даними для розрахунку цих параметрів для сусіднього тонкого шару матеріалу і наступного інтервалу часу. Розрахунок повторюється поки розрахункова середня арифметична вологість всіх тонких шарів матеріалу не досягне заданої кінцевої.

В результаті розрахунку одержані результати: вологість і температура матеріалу, а також вологовміст і температура сушильного агенту для кожного тонкого шару матеріалу через задані проміжки часу. За результатами розрахунку побудовані графіки, які відображають зміну зазначених параметрів сушіння з часом.

З отриманих графіків зміни вологості і температури, видно, що температура матеріалу різко збільшується за короткий проміжок часу і наближається до температури СА на вході в матеріал, швидкість сушіння дещо зростає в період нагрівання матеріалу і поступово зменшується зі зменшенням відносної вологості матеріалу.

Проведені розрахунки для різних параметрів сушіння при зниженні відносної вологості від 17 до 7%. Встановлено тривалість сушіння для досягнення необхідної вологості.

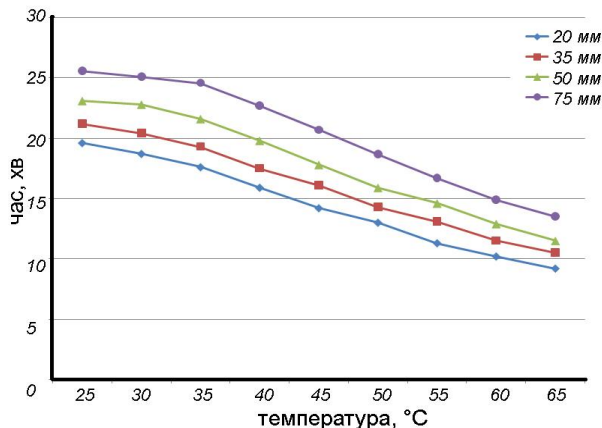


Рис. 3 - Розрахункова залежність тривалості сушіння насіння ріпаку від температури СА і товщини шару матеріалу

**Висновки.** Отримано математичну модель зміни вологості насіння ріпаку з часом для різних температур сушильного агента і початкової вологості насіння, що базується на емпіричних залежностях, на основі яких може бути визначено коефіцієнт сушіння. Запропонована можливість спрощеного теоретичного розрахунку процесу сушіння насіння ріпаку, в результаті чого реалізовано ступінчастий методом за допомогою ЕОМ і за результатами яких можна встановити раціональні параметри сушіння для даної культури.

#### Література

1. Зайцев Н., Бокач А., Лопатьмо Н. Снижение потерь семян рапса при уборке / Земледелие. – 1995. – №5. – С.27.
2. Технологія вирощування озимого та ярого ріпака / І.Д. Ситнік – К.:Знання України. – 2006 р.
3. Кирпа М. Ріпак: особливості обробки та збереження врожаю [електронний ресурс]// «Пропозиція». Український журнал з питань агробізнесу. — Режим доступу до журн.:  
<http://www.propozitsiya.com/?page=146&itemid=3379>
4. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис... доктора техн. наук: 05.20.01 / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.
5. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів. Монографія. –Луцьк: ЛДТУ,2002.– 165с.

6. Канев Н. И. Изменение посевных и технологических качеств семян рапса в процессе сушки // Вісник аграрної науки. – 1991. – № 11 – С. 44–45.

7. Burrell, N.J., G.P. Knight, D.M. Armitage, and S.T. Hill. 1980. Determination of the time available for drying rapeseed before the appearance of surface molds. J. Stored Prod. Res. 16: 115-118.

8. Thomas, P.M. 1984. Swathing - combining, storage and conditioning of canola. p. 1101-1215. In Canola Growers Manual. Canola Council of Canada, Winnipeg, Manitoba.

9. Лыков А.В. Теория сушки – М.: Энергия, 1960. – 472с., ил.

10. Iglesias, H, A, and J. Chirief. 1976. Predication of effect of temperature on water sorption isotherms of food materials. J. Fond Tech. 11 : 109-116.

11. Sun, Da-Wen and Byrne, C., 1998, Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed, Journal of Agricultural Engineering Research, 69, 307-315.

12. Rao, V.G. and Pfof, H.B. 1980. Physical properties related to drying 20 food grains. ASAE Paper No. 80-3539. St. Joseph, MI: ASAE.

*Рецензент д.т.н., проф. В.Ф. Дідух*