

УДК 631.365:631.53.01:633.2

© В.О. Корнелюк, Л.Ю. Забродоцька, к.т.н.  
Луцький національний технічний університет

© В.О. Хвесик, А.В. Хомич, к.т.н.  
Любешівський технічний коледж Луцького національного технічного університету

### **МОДЕЛЮВАННЯ ОСЦИЛЮЮЧОГО РЕЖИМУ СУШІННЯ НАСІННЯ ТРАВ**

*У статті запропоновано як метод інтенсифікації сушіння насіння трав застосовувати осцилюючі режими, що полягають у почерговому вентилювання шару матеріалу сушільним агентом і атмосферним повітрям. Представлено математичну модель, що описує осцилююче сушіння і дає змогу обґрунтувати режимні параметри процесу. Запропоновано заходи для зменшення енергетичних витрат на процес сушіння насіння трав.*

**СУШІННЯ, ОСЦИЛЮЮЧИЙ РЕЖИМ, НАГРІВ,  
ОХОЛОДЖЕННЯ, МОДЕЛЬ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.**

**Постановка проблеми.** Сушіння - основна технологічна операція з приведення зерна й насіння до стійкого стану. Тільки після того, як із свіжозібраної насінневої маси видалено всю надлишкову вологу і зернівки доведено до сухого стану, можна розраховувати на подальшу надійну збереженість продукції.

Усі способи сушіння насіння враховують сорбційні та інші його властивості. Насінина як об'єкт сушіння – це живий організм з капілярно-пористою структурою. Плодові оболонки насіння пронизані капілярами, тому є проникними для пари води. Насінневі оболонки й алейроновий шар, навпаки, є відносно малопроникними для пари води і за неправильного режиму сушіння можуть бути причиною здуття, спричиненого затримкою видалення водяної пари, яка накопичилась всередині ендосперму. Крім того, зародок містить дуже чутливі до температури водорозчинні білки – альбуміни. При температурі вище 41...42°C білки зародка денатурують, тобто насіння втрачає схожість. Білки клейковини більш термостійкі, однак температура нагрівання не повинна перевищувати 55°C. Сушіння – складний технологічний тепломасообмінний процес, який повинен забезпечити збереженість усіх властивостей речовин у насінині, що можливо за умови дотримання оптимальних параметрів цього процесу. Окрім того, особливу увагу слід приділяти енергоефективності процесу, адже це безпосередньо впливає на вартість отриманої продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед численних способів теплового сушіння, які різняться способом підводу тепла до насінини, найпоширенішим є конвективний. Суть його полягає в тому, що тепло передається конвекцією від теплоносія, який вбирає вологу, і видаляється в атмосферу. За таким принципом працюють шахтні, рециркуляційні, барабанні, стрічкові та інші типи сушарок. Процес сушіння ґрунтується на здатності зернівки випаровувати поверхнею вологу за умови, що тиск водяної пари в насінині вищий за тиск в зовнішньому повітрі.

Під час сушіння насіння відбуваються такі фізичні явища: передача тепла від агента сушіння до насінини; рух вологи з центральних шарів до поверхневих; випаровування вологи з поверхні зернівки та дифузія її в навколишнє середовище; переміщення вологи при наявності температурного градієнта внаслідок термовологодовідності.

Закономірності сушіння насіння такі [1,2]:

1) чим більша початкова вологість насіння, тим вища швидкість сушіння в початковий період і тим він коротший. У сирому вологому насінні є механічно зв'язана волога, яка видаляється в першу

чергу. Капілярна волога міцно зв'язана з білками. Тому процес сушіння насіння лімітується сушінням білкового комплексу;

2) під час сушіння насіння нагрівається швидше, ніж випаровується волога. Це й визначає доцільність застосування осцилюючого (з відлежуванням) способу сушіння;

3) сушіння можливе лише тоді, коли тиск пари всередині зернівки вищий, ніж в навколишньому середовищі, тобто відбувається її випаровування. Коли температура поверхні насінини дорівнює температурі середовища сушильної камери, процес сушіння (випаровування води) припиняється;

4) швидкість процесу сушіння залежить від вологості повітря; наприклад, 1 м<sup>3</sup> повітря за температури 20°C поглинає 17г води, 30°C – 31г, 50°C – 90 г, 70°C – 200...250г, 90°C – 400 г і більше.

Ще одним дієвим способом інтенсифікації процесів сушіння сільськогосподарських матеріалів є використання осцилюючих температурних режимів сушіння [3-7]. Осцилюючий температурний процес сушіння сільськогосподарських матеріалів, який досягається шляхом почергового їх нагрівання і охолодження, дозволяє забезпечити умови інтенсивного переміщення вологи із внутрішніх шарів до поверхні.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення та аналіз математичної моделі осцилюючого сушіння насіння трав з метою вибору раціональних параметрів процесу, що дозволить зменшити енерговитрати загалом.

**Результати дослідження.** Тривалість нагрівання матеріалів в процесі їх сушіння залежить від часу взаємодії із сушильним агентом. Підвищення температури сушильного агенту у два рази дозволяє зменшити час нагрівання матеріалу до гранично допустимої температури за 1,5...6,0 с, але вологовіддача не перевищує 1% [8].

Сушіння насінневих сільськогосподарських матеріалів вимагає "м'яких" температурних режимів, які досягаються у сушарках з нерухомим шаром. Підвищення ефективності використання таких сушарок залежить від вдосконалення режимів сушіння. Воно полягає у використанні осцилюючого температурного процесу з метою інтенсифікації вологовіддачі у всіх періодах сушіння.

Теоретичний опис конвективного сушіння сільськогосподарських матеріалів можна здійснити шляхом складання інтегральних рівнянь тепло і масоперенесення. Такий метод є складним і не дає можливості використовувати результати при інженерних розрахунках елементів сушарок та вдосконаленні методів сушіння [3,4].

Для розв'язку ряду практичних задач, як правило, достатньо отримати загальну характеристику процесу шляхом побудови кривих сушіння, швидкості і температури. Аналіз кривих дозволяє отримати рівняння кінетики сушіння:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K (W - W_k) , \quad (1)$$

де  $dW/d\tau$  - похідна вологості за часом;

$K$  - коефіцієнт сушіння, який залежить від властивостей насіння та режиму сушіння,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$W_k$  - кінцева вологість матеріалу, %.

В свою чергу, коефіцієнт сушіння  $K$  прямо пропорційний швидкості сушіння і обернено пропорційний початковій вологості матеріалу  $W_n$ . Він визначається відносним коефіцієнтом сушіння  $\chi$  як тангенс кута нахилу прямої  $K = \chi N$ .

$$\chi = \frac{1,8}{W_n} . \quad (2)$$

Сушіння матеріалу в кінцевому варіанті являє собою масообмін вологи між матеріалом і навколишнім середовищем. При цьому обов'язковим є також перенесення вологи із середини матеріалу до його поверхні. Активізація вказаних процесів у період постійної швидкості сушіння можлива при збільшенні рушійних сил, якими є градієнти перенесення вологи. Особливу увагу необхідно звернути на градієнт температур, як рушійну силу в процесах передачі тепла.

Для конвективного теплообміну швидкість сушіння в період постійної швидкості для капілярпористих колоїдних тіл, якими є насіння трав, можна визначити за формулою Ньютона [9].

$$\alpha_q (t_{ca} - t_n) = \frac{N \cdot \rho_0 \cdot R_v}{100} , \quad (3)$$

де  $\alpha_q$  - коефіцієнт теплообміну;  $t_{ca}$  - температура сушильного агента;  $t_n$  - температура поверхні матеріалу, що піддається сушінню;  $\rho_0$  - густина сухого матеріалу;  $R_v$  - відношення об'єму тіла до його поверхні.

Аналіз відомих моделей [5-8] показує, що для спрощення розрахунків можна зробити допущення, що періоди нагрівання і охолодження відбуваються за лінійним законом. Розрахункова схема процесу сушіння зображена на рис.1.

В процесі сушіння температура матеріалу при поперемінному його нагріванні і охолодженні поверхні визначатиметься як:

при  $\tau \leq \tau_{нагр}$

$$t_n \tau = t_0 + \frac{\tau t_{ca} - \Delta t - t_0}{\tau_{нагр}}, \quad (4)$$

при  $\tau \leq \tau_{охол}$

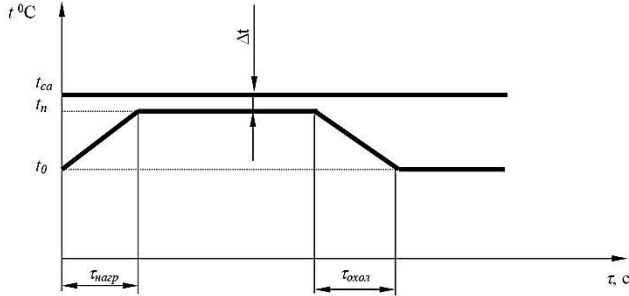


Рис.1 – Схема осцилюючого процесу сушіння насіння трав:  $t_0$  - температура навколишнього середовища;  $t_{ca}$  - температура сушильного агента;  $\Delta t$  - різниця температур сушильного агента і поверхні матеріалу в режимі нагріву;  $t_n$  - температура поверхні матеріалу при постійній швидкості сушіння;  $\tau_{нагр}$  - час прогріву матеріалу;  $\tau_{охол}$  - час охолодження матеріалу.

$$t_n \tau = t_0 + \frac{\tau t_{ca} - t_0}{\tau_{охол}}. \quad (5)$$

Інтегруючи (1) отримаємо:

$$W = W_k + W_n - W_k e^{-K\tau}. \quad (6)$$

З рівняння (3) швидкість сушіння визначатиметься як:

$$N = \frac{100\alpha_q t_{ca} - t_n}{\rho_0 \cdot R_v}, \quad (7)$$

тому з врахуванням (2) отримаємо:

$$W = W_k + W_n - W_k e^{-\frac{180\alpha_q t_{ca} - t_n}{W_n \rho_0 \cdot R_v} \tau}, \quad (8)$$

де  $t_n \tau$  визначається згідно (4) та (5).

Для перевірки теоретичних викладок та побудови графічних залежностей було розроблена програма на ЕОМ, що дозволила реалізувати модель осцилюючого температурного процесу для сушіння насіння трав.

При дослідженні процесу сушіння насіння у товстому нерухомому шарі, останній розбивався на і-елементарних шари. Розрахунок величин  $t_{n_i}$ ,  $\tau$  проводився за допомогою I-d діаграми вологого повітря, шляхом приросту вологовмісту у сушильному агенті внаслідок його проходження крізь шар насіння, що піддавався сушінню.

Значення величин  $R_v$ ,  $\rho_0$ ,  $\alpha_q$ ,  $N$ ,  $\tau_{напр}$ ,  $\tau_{охол}$  встановлювали експериментально та шляхом аналізу літературних джерел.

Побудова кривих сушіння проводилась при допущенні, що коефіцієнт сушіння  $K$  в межах інтервалу часу  $\Delta\tau$  постійний.

Порівняльний аналіз результатів існуючих теоретичних досліджень та розрахунків за запропонованою моделлю проводився для двох методів: зниження вологості насіння від початкового значення  $W=45,0\%$  до кондиційної  $W=14,5\%$  під дією сушильного агента та використання осцилюючого температурного процесу. Для сушіння насіння трав висотою 0,01 м (рис.2, рис.3) тривалість у порівнянні з використанням осцилюючого температурного процесу збільшується у два рази. Аналогічний характер витрат сушильного агента спостерігається у шарах матеріалу за висотою (рис.4, рис.5).

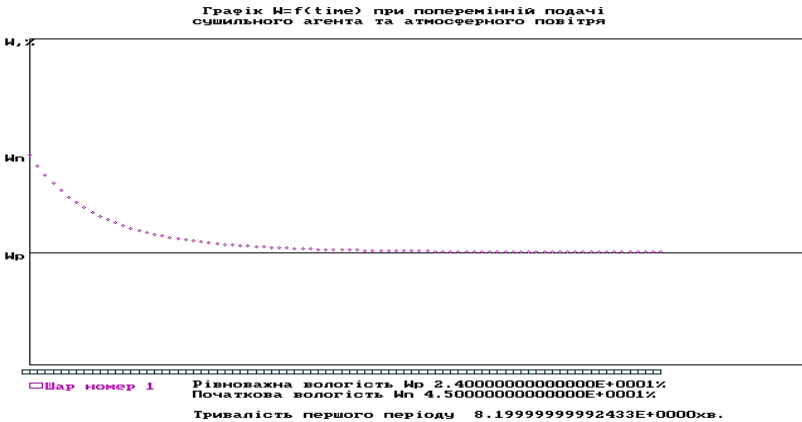


Рис. 2 – Кінетика сушіння при подачі сушильного агента в елементарному шарі

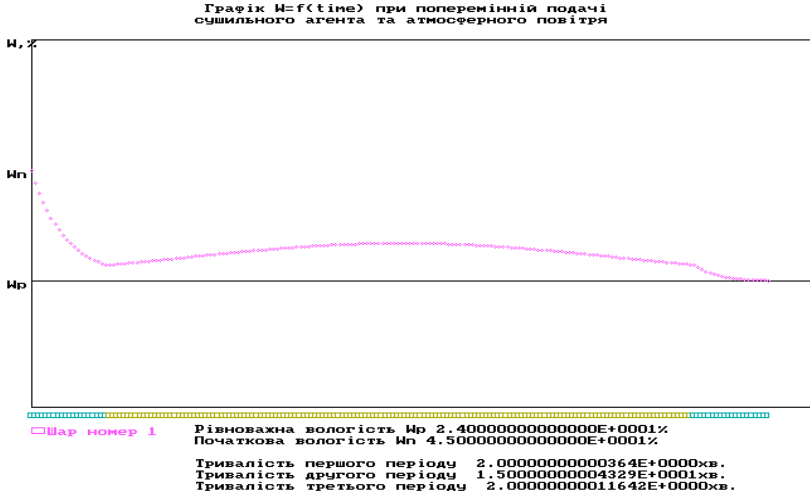


Рис.3 – Кінетика сушіння при осцилюючій подачі сушильного агента та атмосферного повітря в елементарному шарі

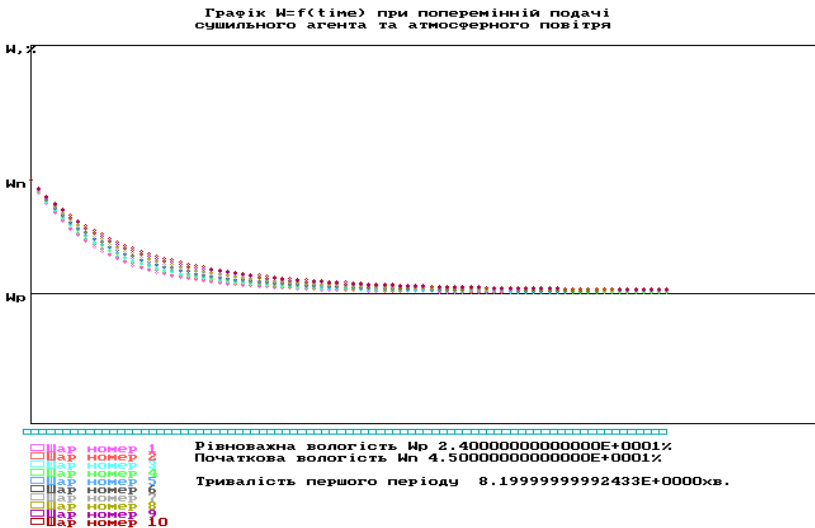


Рис.4 – Кінетика сушіння при подачі сушильного агента в товстому шарі

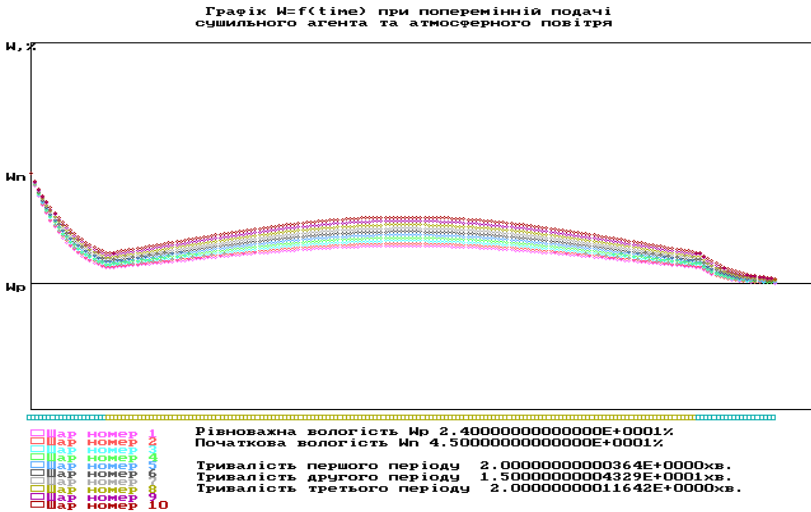


Рис.5 – Кінетика сушіння при осцилюючій подачі сушильного агента та атмосферного повітря в товстому шарі

**Висновки.** Теоретичний розрахунок за запропонованою вдосконаленою моделлю конвективного осцилюючого сушіння насіння трав свідчить про доцільність використання такого методу як засобу інтенсифікації процесу. Незважаючи на те, що загалом збільшується час сушіння за рахунок вентилявання атмосферним повітрям у 2.3 рази, суттєво зменшується час роботи теплогенераторів для формування сушильного агента (у 2.1 рази). Це призводить до економії паливних матеріалів і, як наслідок, здешевлює процес післязбирального обробітку насінневого матеріалу.

Модернізуючи існуючі у господарствах сушарки та доповнивши їх блоки підготовки сушильного агента пристроями зміни напрямку подачі повітря можливо суттєво вдосконалити технологію сушіння сільськогосподарських насінневих матеріалів.

### Література

1. Особливості сушіння зерна окремих культур [Електронний ресурс]/ Режим доступу: [http://studopedia.su/8\\_63585\\_osoblivosti-sushinnya-zerna-okremih-kultur.html](http://studopedia.su/8_63585_osoblivosti-sushinnya-zerna-okremih-kultur.html)



2. Особенности работы зерносушилок разного исполнения [Электронный ресурс] / Агропромэкс. Режим доступа до журналу: <http://agropromex.ru/stati-i-publikaczii/nauchnyie-stati/osobennosti-raboty-zernosushilok-raznogo-ispolneniya.html>

3. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів. Монографія. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165с.

4. Забродоцька Л.Ю. Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав: Монографія / Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. – 164 с.

5. Котов Б.І. До питання зниження енергоємності процесів сушіння зерна / Б.І. Котов, В.О. Лісецький // Перспективи розвитку механізації, електрифікації та технічного сервісу сільськогосподарського виробництва: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Глеваха: ІМЕСГ, ІТС. – 1996. – С. 67.

6. Котов Б.І. Застосування імпульсно-періодичних режимів вентилявання при реалізації енергоощадної двостадійної технології сушіння зерна / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства: науково-виробничий журнал. – К, 2003 р. – № 2. – С. 69–74.

7. Котов Б.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Липунов // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин.- Кіровоград, 2012. – №42. – с. 340 – 346.

8. Didukh V. Investigation of vibrating temperature process efficiency when drying agricultural materials / V.Didukh, R Kirchuk. Commission of motorization and energetics in agricultural. Volume II. Lublin-2002, p.46-51.

9. Лыков А.В. Теория сушки. М., «Энергия», 1968. 472с. ил.

*Рецензент д.т.н. В.Ф. Дідух*