

УДК 631.365.22

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПРИЙОМУ ВІДЛЕЖУВАННЯ ЗЕРНА НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ЗЕРНА АКТИВНИМ ВЕНТИЛЮВАННЯМ

Р.А. Калініченко, канд. техн. наук

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»

У статті теоретично обґрунтовано інтенсифікацію процесу конвективно-го зневоднення зерна після стадії його відлежування. Отримані математичні моделі дозволяють прогнозувати енергозберігаючий ефект застосування імпульсно-періодичного вентилювання зернової масивід співвідношення проміжків відлежування і вентилювання.

Ключові слова: *сушіння зерна, активне вентилювання, коефіцієнт вологопровідності, енергозбереження.*

Проблема. В теперішній час існують різні технологічні прийоми збереження вологого зерна, що гарантують з точки зору збереження якості, безпечно зберігання зерна до моменту його використання.

Термічне сушіння — основний і найбільш ефективний спосіб консервації вологого зерна, оскільки, володіє цілим рядом переваг, які притаманні тільки йому. Серед переваг цього методу консервування: універсальність (насінневе, кормове, продовольче), якісна і довгострокова збереженість зерна, придатність обробленого зерна для багатоцільової реалізації, необмежена можливість споживання людьми, худобою, птицею. Широкі можливості для регулювання пропускнуої здатності, можливість повної автоматизації процесу обробки. Сухе зерно є найбільш стійке при зберіганні, транспортабельне і зручне для переробки [6].

Для забезпечення максимальної ефективності роботи сушильного обладнання особливо важливе значення має вибір раціональних режимів проведення технологічних процесів. Зокрема раціональні режими сушіння зерна повинні забезпечувати високу якість зерна після сушіння і найбільш високу

техніко-економічну роботу сушильних установок. Імпульсно-періодичну подачу агента сушіння використовують як енергозберігаючий прийом при високотемпературному сушінні, так і при низькотемпературному [3].

Тому метою дослідження є теоретичне обґрунтування енергоефективності імпульсно-періодичних режимів сушіння і активного вентилявання зерна.

Матеріали та методика досліджень. Підвищення технологічної і економічної ефективності застосування імпульсно-періодичних режимів активного вентилявання зерна можна досягти на основі дослідження закономірностей міграції вологи як в усій оброблюваній масі так і в кожній зернівці окремо. Відлежування багатокomпонентної за вологістю і температурою суміші зерна дозволяє частково перерозподілити вологу між вологими і сухими компонентами зернової суміші і одночасно зрівняти їх температуру. В процесі відлежування зерна, за законами міграції вологи зовнішня поверхня підсушених зерен починає зволожуватись за рахунок більш високої вологості внутрішніх шарів.

Тому для запровадження процесу сушіння зерна в імпульсно-періодичному режимі необхідно уточнити особливості переміщення вологи в зернівці. Найбільш вірогідним є варіант, при якому в процесі сушіння величина поверхневого вологовмісту U_n зменшується і підтримується на рівні дещо меншому ніж значення крайової гігроскопічності $U_{к.з.}$, що призводить до переміщення вологи у всьому перерізі поверхневої зони [3].

Такий характер переміщення характерний лише для рідкої вологи, що піддержують дослідження [2], критерій фазового перетворення при цьому $e=0$, оскільки конденсація і випаровування відбуваються при тій же температурі. До тих пір поки кількість вологи, що підводиться до поверхні буде не менше тієї, що оточуюче середовище зможе увібрати, вологовміст поверхні буде підтримуватись на досягнутому рівні. Темп видалення вологи при цьому буде незмінним, тобто має місце період постійної швидкості сушіння.

В міру видалення вологи, що поступила до поверхні із найближчих до неї зон, опір переносу вологи із глибинних шарів збільшується. До геометричної поверхні тіла буде поступати менше вологи, чим з неї може випаруватись. Це призведе до випаровування із внутрішніх шарів, тобто відбудеться утворення двох зон випаровування (якщо розглядати зернівку по одну сторону вісі симетрії), поверхневої (дифузійної), в якій $U < U_{к.з.}$ і внутрішньої (капілярної) в якій $U > U_{к.з.}$; так починається період падаючої швидкості сушіння, при якій товщина дифузійної зони поступово збільшується, тобто вологовміст поверхневої

зони поступово зменшується і випаровування відбувається в основному із внутрішньої зони.

В більшості випадків сушіння зерна проходить в період падаючої швидкості сушіння і явище поглиблення зони випаровування видозмінює механізм переносу тепла і маси речовини не тільки всередині тіла, а і за його межами.

Для виявлення впливу величини поверхневого вологовмісту зернівки на інтенсивність її зневоднення, представимо, як функцію величини дифузійної зони коефіцієнт сушіння K з формули Ликова [5]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p). \quad (1)$$

Коефіцієнт сушіння K визначається із аналітичної залежності для середньої швидкості сушіння шару в період падаючої швидкості сушіння [1]:

$$K = \frac{a_m}{R^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{Bi_m}}, \quad (2)$$

де Bi_m — масообмінний критерій Біо, що характеризує співвідношення між інтенсивністю внутрішнього і зовнішнього масообміну і який рівний [5]:

$$Bi_m = \frac{\beta}{a_m} R, \quad (3)$$

де a_m — коефіцієнт теплопровідності матеріалу; R — характерний розмір; β — коефіцієнт теплообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Підставимо у формулу (2) вираз (3) після математичних перетворень отримаємо:

$$K = \frac{a_m}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{5} \cdot \frac{R}{a_m} + \frac{1}{\beta}}. \quad (4)$$

Якщо припустити, що при малих інтенсивностях сушіння коефіцієнт теплообміну β є прямо пропорційний поверхневому вологовмісту, тобто:

$$\beta = s \cdot U_f \cdot F, \quad (5)$$

де s — коефіцієнт пропорційності; F — площа поверхні випаровування для шару $F=4\pi R^2$; то рівняння (4) з урахуванням (5) перепишемо у вигляді:

$$K = \frac{a_m}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{5} \cdot \frac{R}{a_m} + \frac{1}{s \cdot U_n \cdot F}}. \quad (6)$$

Для попереднього аналізу процесу сушіння в переривистому режимі як перше наближення прийемо, що зона випаровування в період падаючої швидкості переміститься в глибину зернівки на відстань Λ (рис.1).

Тоді поверхня зони випаровування зернівки зменшиться і матиме площу:

$$F = 4p(R - L)^2. \quad (7)$$

У залежності (7) винесемо R^2 за дужки, отримаємо:

$$F = 4pR^2 \left(1 - 2 \frac{\Lambda}{R} + \left(\frac{\Lambda}{R} \right)^2 \right). \quad (8)$$

Підставимо (8) у (6) і з урахуванням (8) отримаємо:

$$K = \frac{a_m}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{5} \cdot \frac{R}{a_m} + \frac{1}{s' \cdot U_i \cdot \left(1 - 2 \frac{\Lambda}{R} + \left(\frac{\Lambda}{R} \right)^2 \right)}}, \quad (9)$$

де $s' = s \cdot 4 \cdot p \cdot R^2$.

Формула (9) відображує залежність коефіцієнта сушіння від товщини поверхневої зони.

На рис. 2 графічно представлена залежність коефіцієнта сушіння K від товщини дифузійної зони L , яка отримана з формули (9)

При застосуванні імпульсно-періодичного вентилявання, після стадії відлежування, вологовміст поверхневої зони буде зростати за рахунок вирівнювання

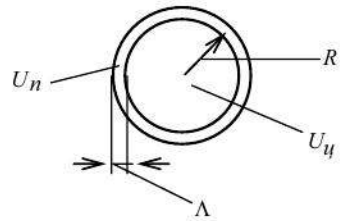


Рис. 1. Схема розподілу вологовмісту в зернівці в період падаючої швидкості сушіння

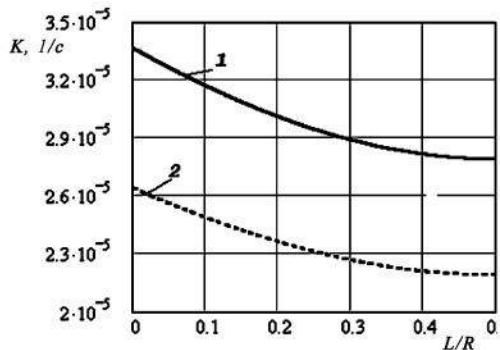


Рис. 2. Залежність коефіцієнта сушіння K від товщини поверхневої зони і коефіцієнта дифузії вологи:

1 — $a_m = 2.6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 — $a_m = 2.0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$

вологи поверхневої зони і центральної частини по всьому перерізу $U_n = U_{\text{ц}}$. Внаслідок цього наступна за відлежуванням стадія, вентилявання, як впливає з формули (9), інтенсифікується.

На рис. 3 зображено вплив величини зони поверхневого вологовмісту на кінетику сушіння зерна, визначений за формулою (9) за умов сталих значень інших факторів.

Для дослідження впливу режимів вентилявання на

енергетичні показники процесу сушіння, проведений порівняльний аналіз результатів теоретичного дослідження неперервного низькотемпературного сушіння елементарного тонкого шару зернового матеріалу, за вихідних умов $U_0^c = 0.25$ кг/кг, $U_k^c = 0.18$ кг/кг, $U_p^c = 0.16$ кг/кг і імпульсно-періодичної подачі сушильного агента (з урахуванням зміни коефіцієнта сушіння K від величини дифузійної зони). Результати досліджень кінетики сушіння зернового шару представлені на рис. 4 графічними залежностями зміни вологовмісту зерна від часу для двох режимів: імпульсно-періодична (3 год вентилявання і 1 год відлежування) і неперервна подача сушильного агента в шар.

Енерговитрати на вентилявання зернового насипу визначаються із залежності:

$$E = N \cdot \sum_{i=1}^n \tau_i, \quad (10)$$

де E — витрати електричної енергії, квт·год/т; τ_i — час подачі сушильного агента, год; N — потужність вентилятора, що визначається із залежності:

$$N = 0.063 \cdot L \cdot H \cdot V^{1.43}, \quad (11)$$

де H — висота шару зернового насипу, м; V — швидкість фільтрації сушильного агента через шар зерна, м/с; L — питомі витрати сушильного агента, м³/год·т.

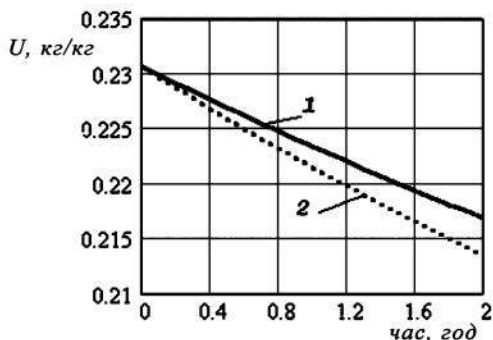


Рис. 3. Кінетика сушіння зерна:

1 — $\Lambda/R = 0.08$; 2 — $\Lambda/R = 0$; $U_n = 0.16$ кг/кг;
 $L = 400$ м³/год т; $t_s = 20^\circ\text{C}$

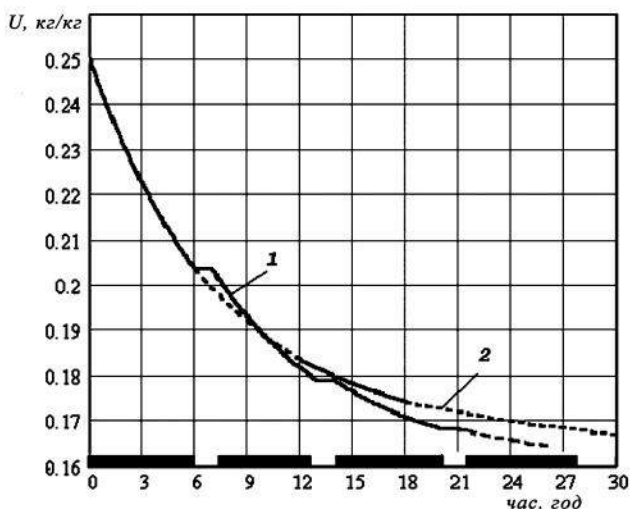


Рис. 4. Кінетика зневоднення шару зерна:

1 — період вентилявання—6 год, відлежування 1— год; 2 — неперервне вентиляван-
ня; $L = 400 \text{ м}^3/\text{год т}$; $T = 293^\circ \text{К}$

Питомі витрати сушильного агента L на вентилявання зерна, визначаються із залежності:

$$L = \frac{3600 \cdot V}{0.75 \cdot H} \quad (12)$$

Характер впливу режимів сушіння зерна на витрати електричної енергії у порівнянні з неперервним вентилявання зображено на рис. 5

Висновки.

1. Дифузійне зволоження поверхні зернівки на стадії відлежування має істотний вплив на збільшення величини коефіцієнта вологообміну, а отже і швидкості сушіння.

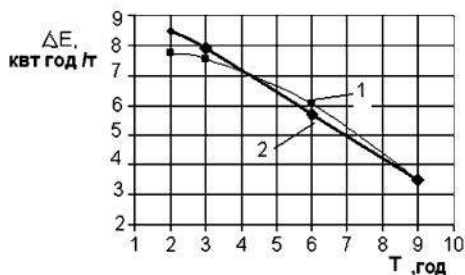


Рис. 5. Залежність зменшення енергоспоживання при імпульсно-періодичному вентиляванні від тривалості періоду вентилявання T і від коефіцієнта дифузії вологи a_m при $L = 400 \text{ м}^3/\text{т год}$:

1 — $a_m = 2.5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, 2 — $a_m = 3.3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$

2. При імпульсно-періодичному вентилюванні, за рахунок інтенсифікації процесу зневоднення зерна після стадії відлежування значно зменшуються затрати енергії на доведення зерна до кондиційного за вологою стану.

Бібліографія

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / Гинзбург А.С. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 527 с.
2. Загоруйко В.А. Термодинамика и теплофизика влажных материалов / Загоруйко В.А., Голиков А.А., Слынько А.Г. — К.: Наукова думка, 1995. — 342 с.
3. Зимин Е.М. Движение влаги в зерновке при сушке / Зимин Е.М., Крутов В.С. // Механизация сельского хозяйства. — 2001. — № 4. — С.11-13.
4. Мельник Б.Е. Технология перемежающегося вентилирования зерна / Мельник Б.Е., Егорова С.В. // Обзорная информация ЦНИИТЭИ Мингаза СССР. — М.: — 1991. — 25 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки / Лыков А.В. — М.: Энергия, — 1968. — 471 с.
6. Трисвятский Л. А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Под ред. Л. А. Трисвятского. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Агропромиздат, 1991. — 415 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОТЛЕЖИВАНИЯ ЗЕРНА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЦЕЛИ ПРОЦЕССА ЕГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ АКТИВНЫМ ВЕНТИЛИРОВАНИЕМ

В статье теоретически обоснована интенсификация процесса конвективного обезвоживания зерна после стадии его отлеживания. Полученные математические модели позволяют прогнозировать энергосберегающий эффект от применения импульсно-периодического вентилирования зерновой массы в зависимости от соотношения промежутков отлеживания и вентилирования.

Ключевые слова: сушка зерна, активное вентилирование, коэффициент влагонепроводности, энергосбережения.

This paper theoretically grounded intensification of convective dehydration process of grain after being softened him. A mathematical model to predict the effect of the application of energy-efficient pulse-periodic aeration of grain mass, depending on the ratio of periods softened and ventilation.

Key words: grain drying, aeration, moisture diffusion factor, energy saving.