

**Поп'як Олександр Геннадійович**

аспірант кафедри агроінженерії та технічного сервісу

Національний аграрний університет України

«Вінницький національний аграрний університет», Україна

## ПЕРЕМІЩЕННЯ ВОЛОГИ В ЗЕРНІ ПІД ЧАС ЙОГО СУШІННЯ

**Анотація.** В статті наведено схему механізму видалення вологи при сушінні зерна. Виражено закон переміщення вологи в межах зерна, яке висушується. Зображено Ізопотенціальної лінії тепло-, вологопереносу. Виявлено залежність між швидкістю зміни температури, прогрівання або охолодження зерна та його температуропровідності.

**Ключові слова:** сушіння зерна; видалення вологи з зерна; ізопотенціальної лінії тепло-, вологопереносу.

Сушіння, нагрівання та охолодження зерна - типові нестационарні процеси тепло-, вологопереносу, т. д. Такі процеси, які супроводжуються зміною температури і вологості зерна, а також щільності потоків теплоти і вологи в часі. При сушінні в зерні виникають градієнти температури і вмісту вологи, під дією яких відбувається перенесення теплоти і вологи всередині зерна, з'являються термічні і об'ємні напруги.

У загальному випадку механізм видалення вологи з зерна при конвективному сушінні схематично може бути представлений таким чином (рис. 1).

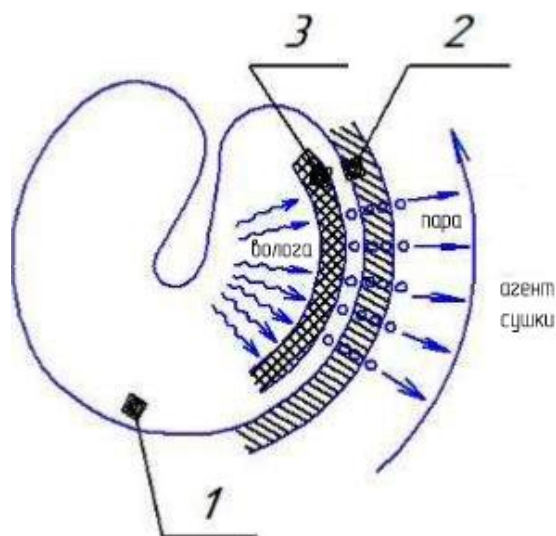


Рис. 1. Схема механізму видалення вологи при сушінні зерна:

1 – зернівка; 2 – граничний шар; 3 – зона випаровування

Вздовж поверхні зернівки рухається агент сушіння з певними параметрами. Тепло від агента сушіння конвективним способом передається зернівці; її поверхня нагрівається, і частина вологи, що знаходиться біля поверхні, випаровується. В результаті по товщині зернівки створюються перепади вмісту вологи, температури і тиску, під дією яких волога безперервно підводиться до поверхні, де випаровується. Молекули пара дифундують через зовнішній шар і поглинаються агентом сушіння. Обов'язкова умова процесу видалення вологи з поверхні зернівки – це наявність різниці між парціальним тиском у її поверхні і в агента сушіння.

Волога випаровується не з поверхні зернівки, а з зони, розташованої в периферійній частині зернівки. Більш того, положення цієї зони не залишається незмінним: вона поступово переміщається всередину зернівки. Початок поглиблення зони випаровування багато дослідників пов'язують з початком видалення з зерна пов'язаної вологи. При поглибленні зони випаровування поверхня зернівки залишається обезводненою, позбавленою захисного фактора, а тому може нагріватися до високих температур.

Зерно має складну геометричну форму, а зерновий шар являє собою дисперсне середовище, в якому зернівки орієнтовані в просторі довільно. Крім того, процеси переносу теплоти і вологи всередині зерна взаємопов'язані і впливають один на інший, а теплофізичні і вологообмінні властивості зерна залежать від його вологості і температури, внаслідок чого диференціальні рівняння тепло-вологодпереносу мають нелінійний характер.

Закон переміщення вологи в межах зерна, яке висушується, в загальному вигляді можна виразити таким чином:

$$qt = -(at\rho_0\nabla u + at_t \rho_0\nabla t + at_p\nabla P),$$

де  $qt$  – інтенсивність потоку внутрішньої вологи в зерні,  $кг/(м^2 \cdot год)$ ;

$at$  – коефіцієнт вологообміну,  $Вт/(м^2 \cdot кг)$ ;

$\rho_0$  – щільність абсолютно сухої частини матеріалу,  $кг/м^3$ ;

$at_t$  – коефіцієнт термодифузії,  $(°C)^{-1}$ ,

$\nabla u$  – градієнт вмісту вологи,  $кг/(кг \text{ сухої речовини} \cdot м)$ ;

$\nabla t$  – градієнт температури,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ;

$atr$  – коефіцієнт вологообміну, віднесеного до  $\nabla P$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{кг})$ ;

$\nabla P$  – градієнт тиску,  $\text{Па}/\text{м}$ .

Знак мінус в рівнянні означає, що рух води направлено в сторону зменшення вологості (від центру до поверхні зернівки).

Аналогічно переносу електричних зарядів або переносу теплоти рух рідини і пари у вологому зерні походить від вищого потенціалу до нижчого. Сукупність точок висушується матеріалу, що мають однакові потенціали переносу води, утворює ізопотенціальної (ізотермічні, ізоконцентраційні і т. д.), перетин цих поверхонь площиною – ізопотенціальної лінії.

Рухійною силою процесу, потенціалом перенесення води всередині матеріалу є загальний тиск всередині матеріалу, що висушується, осмотичний тиск, парціальний тиск пара та ін. Однак основними законами внутрішнього масообміну (переміщення води всередині матеріалу), служать закони вологопровідності і термовологопровідності.

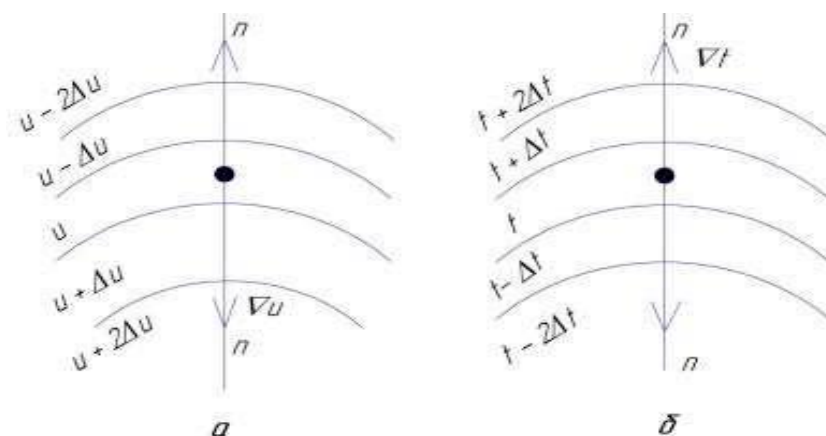


Рис. 2. Ізопотенціальної лінії тепло-, вологопереносу:  
**а** - ізоконцентраційні (що з'єднують точки з однаковою концентрацією води (влагосодержанием)); **б** – ізотермічні (що з'єднують точки з однаковою температурою);  $u$  – вологовміст зерна,  $\text{кг}$  води / ( $\text{кг}$  сух. речовини);  $t$  – температура нагріву зерна,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\nabla u$  – градієнт вмісту води,  $\text{кг}$  води / ( $\text{кг}$  сух. речовини  $\cdot$   $\text{м}$ );  
 $\nabla t$  – градієнт температури,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$

На рис. 2 зображені ізоконцентраційні і ізотермічні лінії, побудовані нормалі (n - n) до них, показані напрями векторів градієнта вологовмісту ( $\nabla u$ ), градієнта температури ( $\nabla t$ ) Під градієнтом концентрації вологи розуміють векторну величину, чисельно рівну збільшенню вмісту вологи на одиницю довжини нормалі і спрямовану по нормалі в бік більшої концентрації вологи. Градієнт температури - вектор, чисельно рівний зміни температури на одиницю довжини нормалі і спрямований по нормалі в сторону збільшення температури. Щільність потоку вологи - вектор, спрямований у бік, протилежний градієнту концентрації вологи (в разі вологоводності), або градієнту температури (в разі термовологоводності), і чисельно дорівнює кількості вологи, яку переносять ведініцу часу через одиницю ізопотенціальної поверхні.

З цієї залежності випливає, що швидкість зміни температури, прогрівання або охолодження зерна прямо пропорційна його температуроводності. Нагадаємо, що диференціальне рівняння (3.6), виражене в приватних похідних, має незліченну безліч рішень. Щоб вирішити задачу однозначно, т. д. Виділити з безлічі одне єдине рішення, в кожному разі формулюють конкретні умови однозначності (крайову задачу): геометричні, граничні, початкові та ін. Рівняння (3.6) можна вирішити методом поділу змінних, інтегральних перетворень Лапласа, Фур'є або інших операційних методом, чисельним методом, методами моделювання і т.д. Для спрощення обчислень в окремих випадках зерновоїслої можна умовно розглядати як суцільне тіло.

#### Список джерел:

1. Курочкин А.А. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, А.С. Гордеев. – М.: Колосс, 2007. –560 с.
2. Личко Н.М. Технология переработки продукции растениеводства. М:Колосс,2000.– 214 с.
3. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. – М: Колос, 2003– 624 с.

4. Antonijevic D. Unsteady heat and mass transfer during combined conductiveconvective drying of colloidal capillary-porous materials // *Drying Technology*. – 2000. – 18:1, pp. 531-532.
5. Converse H.H. Transient heat transfer within stored in a cylindrical bin. *Amer. Soc. Agr. Engrs.*, 2006. - № 855, pp. 254-256.
6. Fudym O., Carrere-Gee C., Lecomte D., Ladevie B. Drying kinetics and heat flux in thin-layer conductive drying // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2003. – 30:3 pp. 333-347.