

### Література

1. Вобликов Е.М. Послеуборочная обработка и хранение зерна. Учебное пособие / Е.М. Вобликов, В.А. Буханцов. – Ростов н/Д.: Издательский центр «Март», 2001. – 240 с.
2. Инструкция № 9-5-82 по очистке и выделению мелкой фракции зерна, эксплуатации зерноочистительных машин на элеваторах и хлебоприемных предприятиях. – М.: Минзгос СССР, 1982. – 90 с.
3. Евдокимова Г.И., Коропенко С.В. Проблемы послеуборочной обработки и хранения голозерного овса // Наукові праці ОНАХТ / Міністерство освіти і науки України. – Одеса; 2007. – Вип. 30. – Т. 2. – С. 153-156.

УДК 664.8.047

## КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В ТЕРМОСИФОННО-МЕХАНІЧНОМУ АГРЕГАТІ

Воскресенська О.В., інженер

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Розглянуто процес сушіння деяких зернових культур в апараті на основі термосифону, що обертається, як один із засобів комбінованого сушіння, розглянуті його недоліки і переваги. Запропоновані режими сушки в термосифонно-механічному агрегаті.*

*Process of drying of some grain crops in the device on the basis of a rotating thermosiphon as one of ways of the combined drying, its lacks and advantages are considered is considered. Drying modes in the thermosiphon-mechanical unit are offered.*

Ключові слова: термосифонно-механічний агрегат, кінетика процесу сушіння.

У різних виробництвах широко поширені процеси теплової сушки, при якій для видалення вологи з матеріалу в основному застосовують методи, засновані на спалюванні природного палива і продуванні зернової маси потоком гарячого повітря з подальшим викидом тепла в атмосферу. Подібний процес є вкрай неефективним з економічної точки зору, оскільки велика частина тепла, отриманого від згорання органічного палива, викидається в атмосферу і лише мала доля відходить безпосередньо на випар вологи і сушку зерна, що безпосередньо веде до подорожчання собівартості зерна та іншої зернової продукції. Аналіз світової практики сушіння дисперсних харчових продуктів [3,5] показує, що 10 % всіх енерговитрат припадає на привід вентиляторів, а інші 90 % – на сушіння. Теплова енергія витрачається в середньому так: на випар вологи витрачається 40 %, на нагрівання зерна – 10 %, на нагрів повітря і випареної вологи до температури сушильного агента 20 %, а 30 % теплоти втрачається у довкілля. Для виключення перерахованих недоліків пропонується новий метод сушіння зернових культур, заснований на кондуктивному нагріві матеріалу в комбінації із застосуванням механічного перемішування.

Сушіння дисперсного харчового продукту – це один з найбільш складних процесів термообробки, оскільки в її процесі змінюється агрегатний стан води в об'єкті, змінюються властивості одного продукту, а інколи і його форма. Сушку більшості харчових продуктів, призначених для живлення, здійснюють заздалегідь нагрітим повітрям. Виключення представляє сушка зернових, при якій сушильним агентом є суміш топкових газів і повітря. Безпосередній контакт продуктів згорання із зерном погіршує його якість у зв'язку з можливим проникненням у продукт канцерогенних компонентів. А викид топкових мас в атмосферу, яким супроводиться такий процес, значно погіршує екологічний фон.

Сушка є енергоємним процесом. Енергія, необхідна для перетворення 1 кг води на пару складає 2,7 Мдж, проте сушильні технології споживають в 2,5–3 рази більше [5]. Менші витрати енергії характерні для комбікормової і зерносушильної технологій. Але досягається це зниженням екологічної безпеки процесу, адже сушильним агентом в цих технологіях є суміш топкових газів і повітря. Для переважної більшості харчових технологій питомі витрати складають порядку 7–8 Мдж на 1 кг випареної вологи.

Ефективною дорогою комплексного вирішення проблем енергетики і екології при термообробці дисперсних зернових продуктів є використання в технологіях теплових труб (ТТ) і термосифонів (ТС). У ТТ і ТС реалізується замкнений випарно-конденсаційний цикл, який дозволяє передавати великі теплові потоки при малому перепаді температур на значні відстані. Крім того, вони ще мають деякі тепло-технічні, технологічні та експлуатаційні переваги. Для організації процесу сушіння не потрібно спалювання органічного палива, а вся корисна робота проводиться за рахунок електроенергії.

Для вирішення цих питань були проведені експериментальні дослідження. Застосування термосифонно–механічного агрегату (рис.1) дає можливість вирішити поставлені завдання.

Термосифонно–механічний агрегат (ТМА) складається з корпусу 1, конденсатора 2, парогенератора 3, електроприводу 4. Обертвовий термосифон представляє собою герметично закриту порожнину, частково заповнену теплоносієм. При підводі теплоти до випарника теплоносій починає кипіти, пара, що утворюється, направляється в конденсатор, де конденсується на стінках, віддаючи теплоту фазового переходу охолоджуючому середовищу. Пар переміщується за рахунок різниці тиску в випарнику і конденсаторі в результаті зменшення об'єму при конденсації пара. Конденсат під дією гравітаційних сил рухається назад у випарник. Таким чином, в обертвовому термосифоні реалізується замкнутий цикл. Продукт надходить у корпус зверху на нагріту поверхню конденсатора. Відбувається нагрівання продукту, одночасно сушіння і його перемішування, що запобігає перегріву деяких застійних зон, після чого висушений продукт вивантажується.

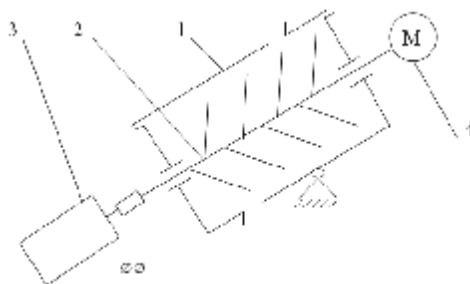


Рис. 1 – Схема термосифонно–механічного агрегату

Проведено ряд дослідів з вареним горохом, який використовується в харчоконцентратній промисловості. Була досліджена кінетика процесу (термограми процесу і криві сушіння варено–плющеного гороху показані на рис. 2 і 3) і розраховані питомі енерговитрати, що витрачаються на випаровування 1 кг вологи з продукту. Питомі енерговитрати становлять 3,1 МДж/кг, що набагато нижче від подібних показників по інших типах сушильних апаратів. Запропонована заміна в чинній технологічній лінії з виробництва варено–плющеного гороху існуючих на Одеському харчоконцентратному комбінаті стрічкових сушарок на ТМА показала енергетичну доцільність його впровадження (зниження розрахункових енерговитрат з 4,6 МДж на 1 кг продукту, що виробляється).

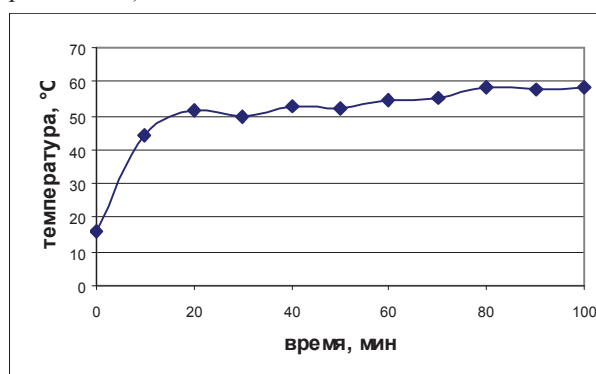
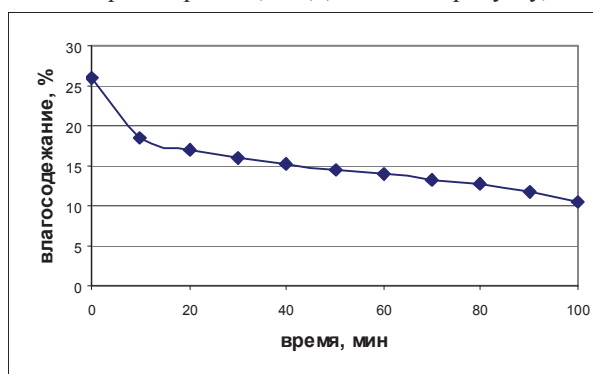


Рис. 2 – Крива процесу сушіння гороху в ТМА

Рис. 3 – Термограма сушіння гороху в ТМА

Експериментальна частина досліджень була доповнена і іншими культурами – зерном пшениці та амаранту.

Швидкість протікання процесу сушіння, ступінь її завершеності залежить від способу підведення теплоти до матеріалу і від режиму сушіння. На малюнках 4 і 5 показані залежності кінетики сушіння цих культур від тиску (2, 1,75 і 1,5 атмосфери), що створюється всередині термосифону, який є грійною поверхнею ТМА. Збільшуючи частоту обертів термосифонів до 40 об/хв досягали інтенсифікації процесу, так як тривалість сушіння знижувалася до 40–ка хвилин, що зображено на рис. 6.

Розрахунок тривалості процесу сушіння дисперсних матеріалів [9] виглядає так:

$$\frac{m}{V_n} \frac{dU}{d\tau} + k(U_0 - U)(U - U_p) = 0 \quad (1)$$

де  $m$  — маса дисперсного матеріалу;  $V_n$  — обсяг внутрішньопорового простору;  
 $U_0, U, U_p$  — початковий, поточний і рівноважний вологовміст;  
 $k$  — коефіцієнт швидкості сушіння.

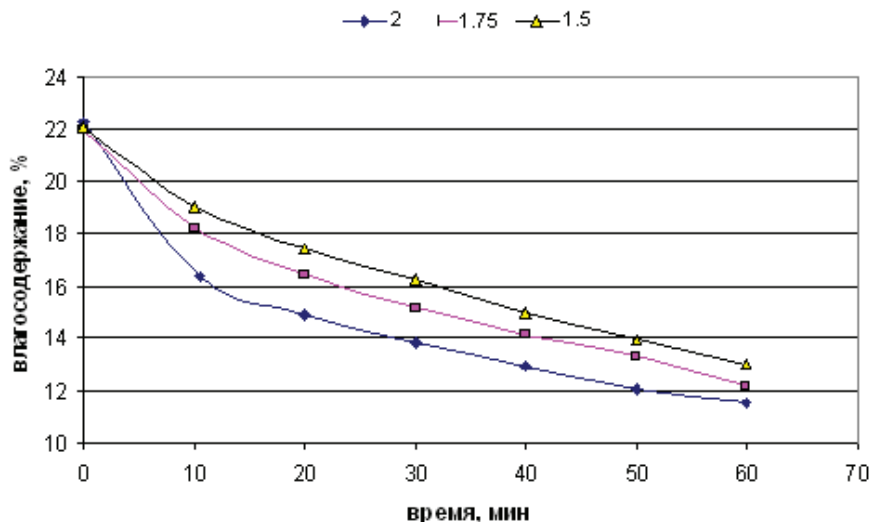


Рис. 4 – Криві процесу сушіння пшениці в ТМА

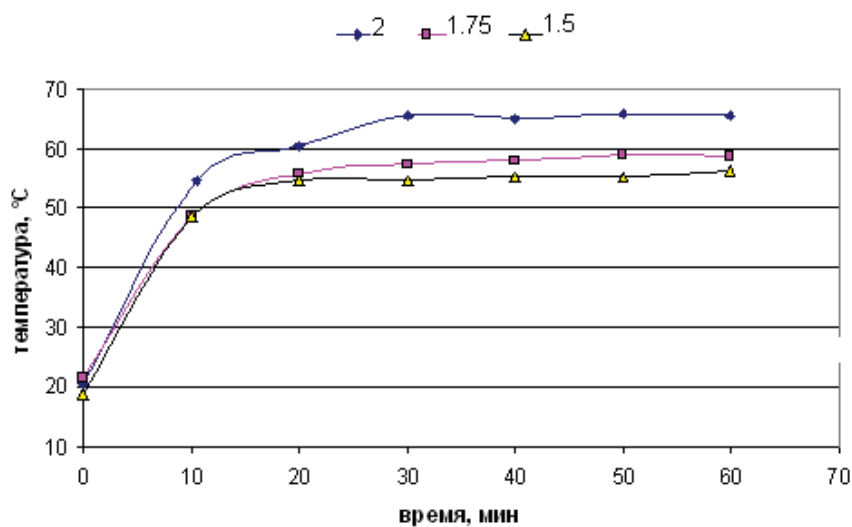


Рис. 5 – Термограми сушіння пшениці в ТМА

Після розділення змінних і інтегрування рішення рівняння (1) можна виразити через формулу, за якою розраховують тривалість сушіння:

$$\tau = \frac{\rho_n}{(1 - \varepsilon) \cdot \Pi \cdot K \cdot (U_0 - U_p)} \cdot \ln \frac{(U_0 - U)(U_{p1} - U_{p2})}{(U_0 - U_p)(U_0 - U_{p1})} \quad (2)$$

де  $\rho_n = \frac{m}{V_m}$  — насипна щільність;

$V_m$  — об'єм дисперсного продукту;  $\Pi = \frac{\rho_k}{\rho_u}$  — пористість;

$\rho_k$  и  $\rho_u$  — уявна і дійсна густина дисперсного матеріалу;

$\varepsilon$  — порізність шару, яка пов'язана з пористістю рівнянням  $V_n = V_m(1 - \varepsilon)\Pi$ ;

$U_{p1}$  и  $U_{p2}$  — початковий рівноважний вологовміст матеріалу і на стадії прогріву.

Формула (2) зручна для обробки експериментальних даних, тому що кут нахилу кінетичних кривих до осі абсцис визначає константу швидкості сушіння  $K$ . Час сушіння дорівнює середньому значенню тимчасових критеріїв теплової обробки окремих частинок матеріалу. Продукт є більшою чи меншою мірою неоднорідним за кінцевим вологовмістом. У безперервно діючому термосифонно-механічному агрегаті із грічою поверхнею, що обертається, проводиться більш ретельна обробка матеріалу в цілому і дисперсних частинок зокрема, що допомагає знизити часовий показник і підвищити однорідність продукту за вмістом води на виході.

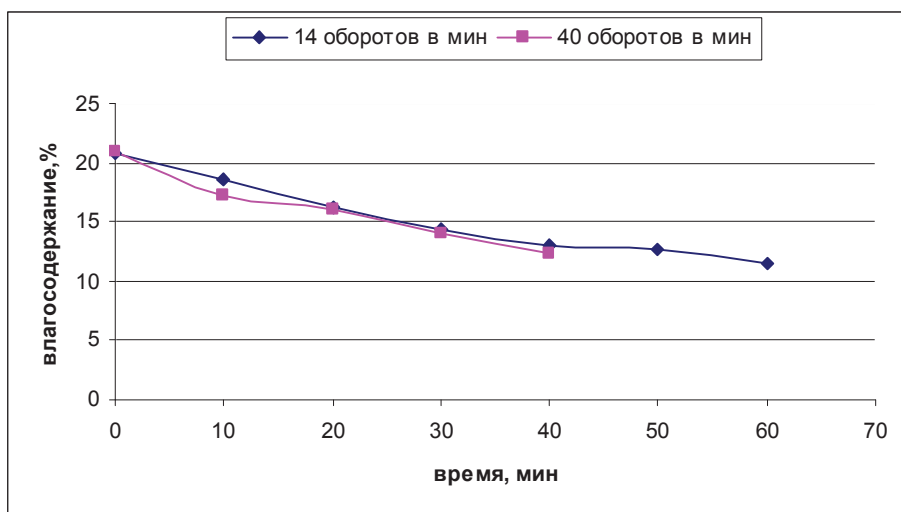


Рис. 6 – Залежність тривалості сушіння амаранту від частоти обертів термосифону в ТМА

Проведені експериментальні дослідження підтверджують перспективність промислового використання термосифонно-механічного агрегату при додатковому проведенні вибору режимів сушки різних зернових культур в ТМА.

#### Література

1. Рудобашта С.П. Фундаментальные исследования тепломассообмена при сушке // Материалы международной конференции СЭТТ-2005. – Московский государственный агроинженерный университет им. В.П.Горячкина. – Россия.
2. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Казмірук Ю.О. Дослідження процесів мікро- і макроперенесення при сушінні в електромагнітному полі // Наукові праці ОДАХТ. – 2007. Вип. 30. том 1 – С. 169–172.
3. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками // Польша. – Пер. с польск. под ред. Щупляка И.А. – Л. – «Химия». – 1975. – 384 с.
4. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. – Киев: Наукова думка. – 1983. – 352 с.
5. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сороковая Н.Н. Кинетика и динамика тепломассопереноса при сушке слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого материала // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса: 2006. – Вип. 28. – Т. 2. – С. 140–146.
6. Бурдо О.Г., Воскресенська О.В., Донкоглов В.І. Тенденції розвитку зерносушильної техніки // Зернові продукти і комбікорми. – 2006. – № 2. – С. 48 – 53.
7. Безбах И.В., Бурдо О.Г. Термомеханический агрегат для дисперсных продуктов // Наукові праці ОДАХТ. – 1999. Вип. 21. – С. 234–237.
8. Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. – М.: Колос. – 1982.
9. Кришер О. Научные основы техники сушки // Пер. с нем. под ред. А.С. Гинзбурга. – М. – Издательство иностранной литературы. – 1961. – 539 с.