

## ЗНЕВОДНЕННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, професор, Терзів С.Г., канд. техн. наук, асистент,  
Яровий І.І., аспірант, Борщ А.А., аспірант  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Вивчення процесів зневоднення харчової сировини під впливом електромагнітного НВЧ поля. Розробка математичної моделі теплового переносу при мікрохвильовому підводі енергії. Експериментальна сушильна установка з мікрохвильовим підведенням енергії.*

*Study of the processes of dehydration of food raw materials under the influence of the electromagnetic microwave field. Development of a mathematical model of heat in the microwave energy supply. Experimental drying system with microwave energy input.*

Ключові слова: математичне моделювання, мікрохвильова сушка, зневоднення, бародифузія, дослідна сушильна установка.

**Вступ.** Традиційні підходи [1,2] в технологіях сушіння зіткнулися з непереборним протиріччям. Із одного боку, для інтенсифікації процесів тепломасопереносу потрібно збільшувати швидкість (тобто витрату) сушильного агента. З іншого боку, чим більша витрата теплоносія, тим більше втрачається теплової енергії з викидами сушильної установки. Вважаємо, що розв'язання зазначеного протиріччя пов'язане із зміною принципів підведення енергії до об'єкта сушіння. Нова технічна ідея, яка оприявнюється в цій роботі, ґрунтується на двох положеннях [2,3]. По-перше, слід зняти з повітря задачі теплоносія і залишити йому лише задачі дифузійного середовища, що забезпечує ефективний «приймання» та відведення вологи з вологого матеріалу. По-друге, організувати об'ємний підвід енергії до продукту. Реалізація першого положення дозволить істотно скоротити втрати тепла з відпрацьованим повітрям, а другого - серйозно скоротити час процесу сушіння.

**Механізми переносу вологи з капілярнопористих тіл.** Відповідно до загальноприйнятої класифікації П.А. Рабіндера існує три форми фізичного зв'язку вологи з матеріалом. Очевидно, що різні за фізичною суттю види зв'язку вимагають і різних механізмів їх розриву. Причому це не обов'язково повинні бути тільки дифузійні процеси. Все визначається рушійними силами, які можуть мати різноманітну природу. Сьогодні створено нові, перспективні види обладнання, ефективність роботи яких складно пояснювати з позицій сучасної теорії сушіння. Із цього випливає:

— техніка зневоднення розвивається стрімкіше, ніж теоретичні обґрунтування нових принципів видалення вологи;

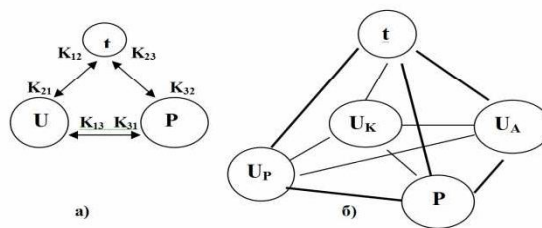
— процеси видалення вологи з матеріалу часто не відповідають поняттю «сушка», рушійні сили цих процесів не відповідають дифузійним принципам;

— часто, зневоднення – це комплекс комбінованих, процесів які зв'язано протікають, що вимагає коректного визначення дійсних механізмів переносу вологи.

Виходячи з цього, проаналізовано можливі схеми перенесення вологи. Вважаємо, що проблеми, які виникають при описі процесу сушіння, пояснюються тим, що автори, прихильники феноменологічного підходу, розглядають сушку як якийсь один процес із постійними коефіцієнтами переносу і формують моделі, виходячи з цих припущень. У даній роботі висунуто гіпотеза що, за принципом суперпозиції, сушка – це результат дії щонайменше трьох процесів: перенесення вологи з поверхні твердого тіла, перенесення вологи в обмежених умовах капілярів і десорбція вологи. Кожен із цих процесів характеризується своїм значенням рушійної сили і кінетичним коефіцієнтом швидкості процесу. Для різних процесів ці параметри можуть істотно відрізнитися. Кожний із трьох процесів підпорядковується своїм законам перенесення і реалізується за рахунок різних механізмів.

Механічне видалення вологи з поверхні тіла проводять при так званій «фільтраційній сушці». При видаленні вологи в середовище перегрітої водяної пари здійснюється типове теплоперенесення випаровуванням. Ці процеси не можна називати «сушкою» і моделювати їх дифузійними механізмами. І питання тут не стільки в термінології, скільки в принципах побудови повних моделей процесів зневоднення.

Дифузійна модель сушіння повинна враховувати розподіл у часі поверхневої вологи ( $U_p$ ), вологи в капілярах ( $U_K$ ) і адсорбційно зв'язаної вологи ( $U_A$ ). При такій постановці ускладнюються як граф теплового переносу (рис.1), так і система рівнянь А.В. Ликова, збільшиться число феноменологічних коефіцієнтів  $K_{ij}$  [4].



а – традиційний підхід, б – запропонована модель

Рис. 1 – Граф тепловологотранспорту при сушці

Висунута гіпотеза не суперечить фундаментальним уявленням фізики вологого капілярно – пористого тіла. Загально визнана схема П.А. Ребіндера форм зв'язку вологи [2]. Видалення вологи різних форм зв'язку – це різні процеси зі своїми коефіцієнтами переносу, зі своїм потенціалом, рушійною силою (табл.1).

Спроба корекції рушійної сили за допомогою показника активності води  $a_w$  відома у світовій практиці [2].

Таблиця 1 – Характеристика основних процесів сушки

Процес	Механізм процесу	Рушійна сила процесу	Кінетичний коефіцієнт
Випарювання вологи з поверхні	Конвективна дифузія	$a_k P_{\Pi} - P_B$	$\beta_K$
Випарювання вологи всередині капілярів та пор	Конвективна дифузія в обмежених умовах	$a_c P_{\Pi} - P_B$	$\beta_C$
Десорбція вологи	Конвективна дифузія	$a_d P_{\Pi} - P_B$	$\beta_D$

**Комбіновані процеси зневоднення продукту при електромагнітному підводі енергії (ІЕМ).** Технічна ідея способу ІЕМ видалення вологи ґрунтується на специфічному характері градієнтів температур і вологовмісту, що формується в продукті при об'ємному, електромагнітному підводі енергії.

Виникає питання моделювання процесу при ІЕМ підводі енергії. Запропоновано [2] нове число енергетичного впливу:  $V_u = N (rV\rho)^{-1}$  для врахування впливу дії ІЕМ. Число  $V_u$  встановлює співвідношення між енергією випромінювання і тією енергією, яка необхідна для перетворення в пару всієї води ( $V$ ), що знаходиться в продукті. У співвідношенні ( $r$  - теплота фазового переходу,  $\rho$  – щільність води).

У запропонованому способі за рахунок ІЕМ частина рідини переходить у парову фазу і всередині капіляру зростає тиск  $P_K$ . За певних умов, цей тиск стає більшим, ніж тиск повітря  $P_{\Pi}$ . Виникає рушійна сила ( $P_{ГД} = P_K - P_{\Pi}$ ). Окремі капіляри, де досягнуто умови для генерації парової фази, починають періодично викидати в повітря рідину, без її випаровування. Ініціюється гідродинамічний потік з капілярів, опір якого на порядок нижче того, яке долає масовий потік. Волога з нанокapілярів викидається в мікрокапіляри, долаючи відповідний дифузійний опір. Частота таких викидів і число функціонуючих капілярів зростає із зростанням  $N$  – потужності випромінювання.

Виходячи з цих положень поставлено наступний експеримент, у якому продування шару зерна повітрям проводилось імпульсно та чергувалось із дією ІЕМ (рис.2).

Рівень енергетичних витрат (рис.2) показує, що видалення вологи проходить у вигляді пари і туману.

Аналіз результатів дослідів показав, що питомі витрати енергії пов'язані з діапазоном зміни температур, особливо в режимі продувки (фільтрації) продукту. І справді, така кореляція виявлена, що дозволяє зробити висновок про те, що досягнутий у досліді рівень енергетичних витрат ( $j$ ) нижчий питомої теплоти фазового переходу для води.

Із аналізу рис. 2 можна зробити два висновки:

— існує чітка залежність між величиною зміни температури при продувці продукту і значенням питомих витрат енергії на видалення вологи з продукту (рис.2, а);

— досягнутий у досліді рівень енергетичних витрат нижчий питомої теплоти фазового переходу для води.

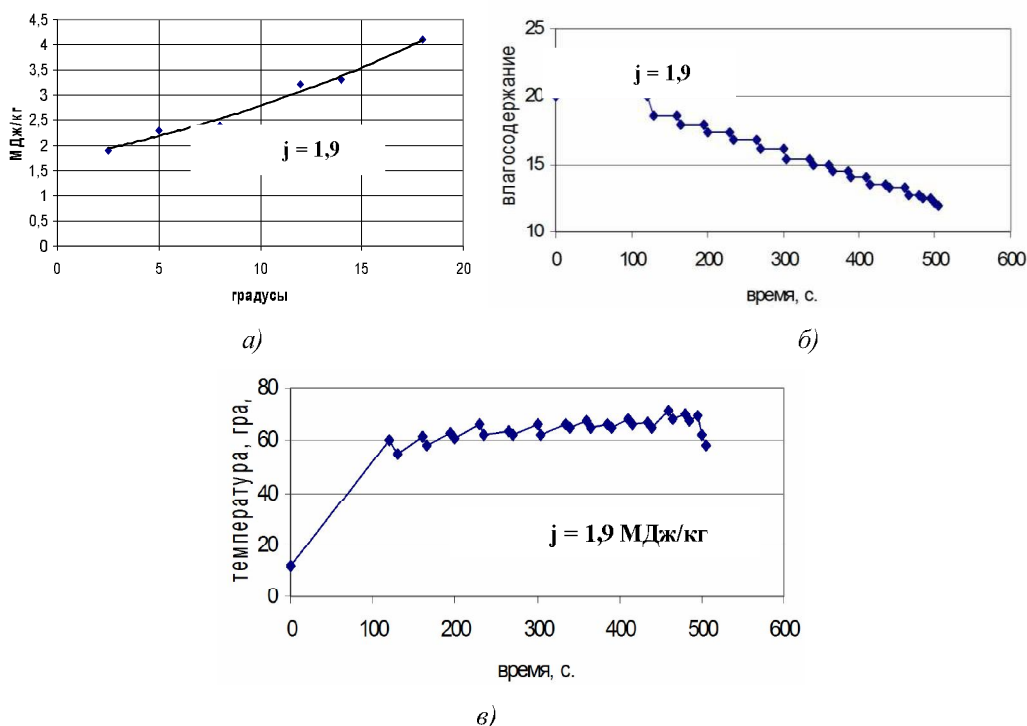


Рис. 2 – Вплив величини охолодження продукту на питомі витрати енергії (а), зменшення вологи (б) і термограму (в) процесу

Другий висновок переконливо підтверджує висунуту гіпотезу про можливість зневоднення в умовах ІЕМ без обов'язкового повного пароутворення.

Так, підтверджено висунуту гіпотезу про можливість організації зневоднення в умовах ІЕМ без обов'язкового повного пароутворення.

Структура рівняння в узагальнених змінних для умов нерухомого шару сировини, ІЕМ підводі енергії та потоку дифузійного середовища має вигляд:

$$Sh = A(Re)^n(Sc)^m(Bu)^k \quad (1)$$

Перспективним способом при організації процесу сушіння є технологія мікрохвильової (МХ) обробки сировини, що має цілий ряд важливих відмінностей від традиційних методів зневоднення.

**Схема експериментального стенду.** Для проведення комплексних досліджень створено стенд, що складається з сушильної камери, що забезпечує мікрохвильовий та інфрачервоний нагрів сировини і лабораторних ваг (рис.3). В якості сировини використовувалось зерно пшениці та варений горох. Продукт розміщувався щільним шаром, на підвісі ваг, в центрі камери.



Рис. 3 – Стенд для дослідження кінетики зневоднення в е/м полі

У результаті серії дослідів по сушці в мікрохвильовому полі отримано залежності, що відображають кінетику процесу зневоднення пшениці при різних потужностях випромінювання і різних величинах навантаження камери.

При різних, але постійній у кожній серії дослідів, потужності мікрохвильового випромінювання, змінювалась питома маса зерна в межах  $G = 1,32-5,26$  кг/м<sup>2</sup>. Дані про вологовміст зерна реєструвались за

показниками електронних ваг, виходячи з балансу маси. За отриманими в результаті серії експериментів даними визначені залежності зміни вмісту вологи в зерні при незмінній потужності мікрохвильового випромінювання. При менших потужностях динаміка процесу пропорційно знижується. Зниження швидкості сушіння не наставало до закінчення експерименту.

**Дослідний зразок установки.** За основу для побудови мікрохвильової сушарки був прийнятий конструктив із модульним принципом компонування. Співробітниками кафедри було створено експериментальну установку (мал. 4) і проведені попередні випробування.



**Рис. 4 – Експериментальний зразок мікрохвильової сушарки**

Основні характеристики сушильної установки:

- споживана електрична потужність:  $\leq 3,0$  KVA;
- потужність МХ випромінювачів:  $\leq 1,5$  KW (р / кер.);
- потужність ІЧ випромінювачів:  $\leq 3,5$  KW (р / кер.);
- швидкість конвеєрної стрічки: 0-0,3 м / хв. (р / кер.);
- габаритні розміри установки, д/ш/в : 3000 / 600 / 1200 мм;
- зниження вологості за прохід:  $\leq 2,6\%$  в.в.;
- продуктивність: 3-10 кг / годину (змінна).

На сьогодні проводяться експериментальні дослідження з сушки зерна пшениці, вареного гороху та кавового шламу. Поточними завданнями досліджень є: оптимізація конструкції мікрохвильових камер, визначення оптимальних режимів сушіння для різних видів сировини та розробка нових способів контролю технологічних параметрів процесу сушіння.

**Висновки.** Перспективний крок в еволюції сушильних установок пов'язаний із завданням організації часткового механічного зневоднення, що можливо при комбінації бародифузійних технологій і принципів фільтраційного сушіння. Результати комплексних досліджень розробленого експериментального зразка мікрохвильової сушильної установки підтвердили перспективність запропонованих технічних рішень для багатоцільової мікрохвильової обробки рослинної сировини. Природно, що запропоновані принципи вимагають ряду конструкторських рішень для забезпечення поточності, безпеки і продуктивності промислових установок.

#### Література

1. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств. – Одесса: Полиграф, 2008, – 244 с.
2. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: Полиграф, 2010, – 368 с.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Энергетический аспект / Труды межд. науч.-тех. сем. Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов. – Воронеж: 2010, – С. 478-487.
4. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии // Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011». – Т.1, – Москва, 2011. – С. 422 – 426.