

Література

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 243 від 01.03.2010 №243 «Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності на 2010-2015 роки» // Офіційний вісник України, 2010 – № 16.
2. Клемеш Й. Реконструкция тепловой сети установки первичной переработки нефти с помощью пинч-анализа / Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский, Н.Д. Андрийчук, П.А. Капустенко, Л.М. Ульянов, А.Ю. Перевертайленко, Б.Д. Зулин // Тези доповідей IX міжнародної конференції «Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв». Ч. 2. Теплові процеси. Одеса. – 1996. – с. 46.
3. Francesco Coletti, Sandro Macchietto, Graham T. Polley. Effects of fouling on performance of retrofitted heat exchanger networks: A thermo-hydraulic based analysis. Computers and Chemical Engineering 35 (2011) 907-917.
4. Mengyan Yang, Barry CITTenden, Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts. Applied Energy, 89, 2012, 67-73.
5. Арсеньева О.П. Уменьшение образования отложений со стороны охлаждающей воды в пластинчатых теплообменных аппаратах промышленных предприятий. // Вестник НТУ "ХПИ" – 2012 - №10 – с. 13-28.
6. Арсеньева О.П. Обобщенное уравнение для расчета гидравлического сопротивления каналов пластинчатых теплообменников. // Интегрированные технологии и энергосбережение – Харьков: НТУ "ХПИ", 2010 – №4 – с. 112-117.
7. Elvis Koku Tamakloe, Graham Thomas Polley, Martin Picon-Nunez. Design of Compabloc exchangers to mitigate refinery fouling. Applied Thermal Engineering, 2012, 1-8.

УДК 664.723.047

ПИТОМІ ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПРИ ЗНЕВОДНЕННІ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

Бурдо О.Г., д-р техн. наук, професор, Терзієв 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. Проблема енергоефективності процесів сушіння в харчовій та переробній промисловості набуває все більшої ваги в зв'язку з монотонним збільшенням вартості енергоносіїв, які в вартості більшості даних технологій складають понад 30%. 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:

1) техніка зневоднення розвивається стрімкіше, ніж теоретичні обґрунтування нових принципів видалення вологості;

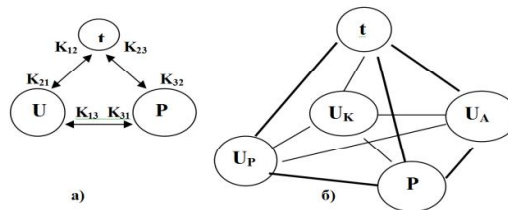
2) процеси видалення вологості з матеріалу часто не відповідають поняттю «сушка», рушійні сили цих процесів не відповідають дифузійним принципам;

3) часто, зневоднення - це комплекс комбінованих, процесів які зв'язано протікають, що вимагає коректного визначення дійсних механізмів переносу вологості.

Виходячи з цього, проаналізовано можливі схеми перенесення вологості. 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 висунута гіпотеза що, за принципом суперпозиції, сушка – це результат дії щонайменше трьох процесів: перенесення вологості з поверхні твердого тіла, перенесення вологості в обмежених умовах капілярів і десорбція вологості. Кожен із цих процесів характеризується своїм значенням рушійної сили і кінетичним коефіцієнтом швидкості процесу. Для різних процесів ці параметри можуть істотно відрізнятися. Кожен із трьох процесів підпорядковується своїм законам перенесення і реалізується за рахунок різних механізмів.

Механічне видалення вологості з поверхні тіла проводять при так званій «фільтраційній сушці». При видаленні вологості 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 вологості (U_P), вологості в капілярах (U_K) і адсорбційно зв'язаної вологості (U_A). При такій постановці ускладнюються як граф тепловологопереносу (рис. 1), так і система рівнянь А.В.Ликова, збільшиться число феноменологічних коефіцієнтів Кіж [4].



а) – традиційний підхід, б) – запропонована модель

Рис. 1 – Граф тепловологопереносу при сушці

Висунута гіпотеза не суперечить фундаментальним уявленням фізики вологого капілярно – пористого тіла. Загальновизнана схема П.А. Ребіндера форм зв'язку вологості [2]. Видалення вологості 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 , відома у світовій практиці [2].

Таблиця 1 – Характеристика основних процесів сушки

Процес	Механізм процесу	Рушійна сила процесу	Кінетичний коеф.
Випарювання вологості з поверхні	Конвективна дифузія	$a_K P_{\Pi} - P_B$	β_K
Випарювання вологості всередині капілярів та пор	Конвективна дифузія в обмежених умовах	$a_C P_{\Pi} - P_B$	β_C
Десорбція вологості	Конвективна дифузія	$a_D P_{\Pi} - P_B$	β_D

Комбіновані процеси зневоднення продукту при електромагнітному підводі енергії (ІЕМ). Технічна ідея способу ІЕМ видалення вологості 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: $Bu = N (\tau V \rho)^{-1}$ для врахування впливу дії ІЕМ. Число Bu встановлює співвідношення між енергією випромінювання і тією енергією, яка необхідна для перетворення в пару всієї води (V), що знаходиться в продукті. У співвідношенні (τ - теплота фазового переходу, а ρ - 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 $P_{П}$. Виникає рушійна сила ($P_{ГД} = P_K - P_{П}$). 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 нанокапілярів 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.

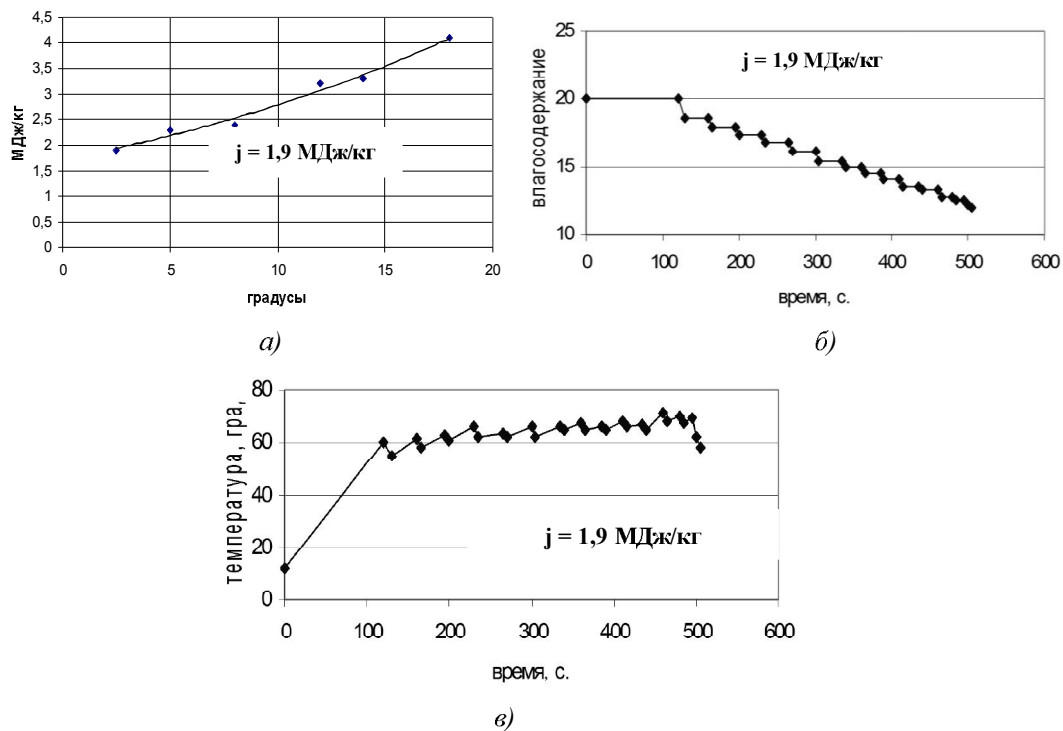


Рис. 2 – Вплив величини охолодження продукту на питомі витрати енергії (а), зменшення вологи (б) і термограму (в) процесу

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 є/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 $G = 1,32-5,26 \text{ кг/м}^2$. Дані про вологовміст зерна реєструвались за показниками електронних ваг, виходячи з балансу маси. За отриманими в результаті серії експериментів даними визначені залежності зміни вмісту води 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.

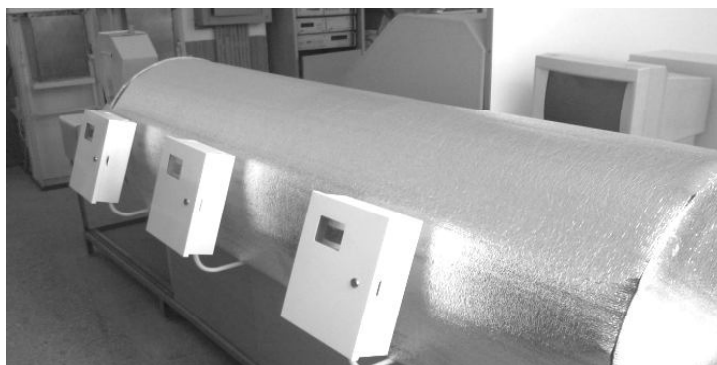


Рис. 4 – Експериментальний зразок мікрохвильової сушарки

Основні характеристики сушильної установки:

- Споживана електрична потужність: $\leq 3,0 \text{ KVA}$;
- Потужність МХ випромінювачів: $\leq 1,5 \text{ KW}$ (р / кер.) ;
- Потужність ІЧ випромінювачів: $\leq 3,5 \text{ KW}$ (р / кер.) ;
- Швидкість конвеєрної стрічки: $0-0,3 \text{ м / хв.}$ (р / кер.) ;
- Габаритні розміри установки, д/ш/в : $3000 / 600 / 1200 \text{ мм}$;
- Зниження вологості за прохід: $\leq 2,6\% \text{ в.в.}$;
- Продуктивність: $3-10 \text{ кг / годину}$ (змінна).

На сьогодні проводяться експериментальні дослідження з сушки зерна пшениці, вареного гороху та кавового шלאму. 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 – 244с.
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.

УДК 66.047

ЕЛЕКТРОІМПЕДАНСНА ТОМОГРАФІЯ ЯК МЕТОД НАТУРНОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МАСОПЕРЕНОСУ РЕЧОВИНИ

Балабан С.М., к.т.н., доц.
Яворський Б.І., д.т.н., проф.
Промович Ю.Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль

Доведено доцільність використання електроімпедансної томографії, як методу неруйнівного контролю за процесами масопереносу, зокрема сушіння, представлено структурну схему електроімпедансного томографа і результати дослідження процесів розподілу вологи і концентрації напружень під час сушіння зразків цегли-сирцю в лабораторних умовах.

Practicability of using the electro impedance tomography as the technique of non-destructive testing of mass transfer processes, drying in particular, is proved; the structural scheme of electro impedance tomography is proposed; the results of investigating the moisture destruction and the stress concentration while drying the brick row samples in the laboratory are analyzed.

Ключові слова: електроімпедансна томографія, масоперенесення, сушіння, вологість, цегла-сирець.

Постановка проблеми. З поміж технологічних процесів хімічної, харчової та спорідненими з ними галузями промисловості, сушіння виділяється складністю, довготривалістю, енергоємністю і дороговизною. В окремих випадках, наприклад, під час конвективного сушіння з періодичною подачею теплоносія, необхідно контролювати не тільки загальну вологість, але й розподіл вологи в структурі матеріалу. Від такої інформації залежить тривалість періодів подачі сушильного агента і відстоювання. Для вирішення поставлених завдань пропонується використовувати неруйнівні методи контролю за розподілом вологи.

Впровадження у виробництво перспективних і ефективних методів сушіння, зокрема конвективного сушіння з періодичною подачею сушильного агента, вимагає використання безперервних неруйнівних засобів контролю за вологістю виробів, що піддаються сушінню. Оскільки, якість і ефективність сушіння залежать від рівномірності висихання виробів, важливо при цьому правильно встановити тривалість циклів подачі сушильного агента і відстоювання. Отже, запропонований спосіб контролю повинен