

УДК 663.933.061- 027.332:537-962

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНЦЕНТРУВАННЯ ЦУКРОВИХ РОЗЧИНІВ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ВАКУУМ- ВИПАРНОМУ АПАРАТІ

Бурдо О.Г., д.т.н.,  
Різниченко Т.А., аспірант,\*  
Ружицька Н.В., к.т.н.

*Одеська національна академія харчових технологій*

**Анотація** – у статті для інтенсифікації процесу вакуум-випарювання запропоновано забезпечити рівномірність енергопідведення і виключити проміжний теплоносій за рахунок використання мікрохвильових технологій. Наведено результати експериментальних досліджень концентрування екстрактів стевії, кави, розчинів цукру та NaCl. Показано вплив питомого підведення енергії, тиску в апараті, площі поверхні випаровування на інтенсивність процесу концентрування харчових продуктів на прикладі розчину цукру. Отримано критеріальне рівняння періодичного процесу вакуум-випарювання в умовах дії мікрохвильового поля.

**Ключові слова** – мікрохвильове поле, вакуум-випарні апарати, цукрові розчини, стевія.

**Постановка проблеми.** Концентровані і сухі екстракти смакових, ароматичних і біологічно активних речовин з дорогої рослинної сировини, мають тривалі терміни зберігання, зручні для транспортування та використання як у харчових і фармацевтичних виробництвах, так і в побуті.

**Аналіз досліджень за темою статті.** В процесі концентрування екстрактів випарюванням, їхня теплопровідність зі збільшенням вмісту сухих речовин зменшується. За рахунок цього, у більшості існуючих випарних апаратів не забезпечується рівномірне підведення енергії до продукту, що веде до його «пригоряння», тобто термічному пошкодженню, а також знижує енергетичну ефективність процесу [1]. В той же час, низькі температури обробки не дозволяють інактивувати всю патогенну мікрофлору в продукті, що знижує безпечність та терміни його зберігання і викликають необхідність використання консервантів. Ряд робіт підтверджує ефективність низькотемпературної пастеризації і стерилізації харчових продуктів у мікрохвильовому полі [2].

© Бурдо О.Г., д.т.н., Різниченко Т.А., аспірант, Ружицька Н.В., к.т.н.

\* Науковий керівник – Бурдо О.Г., д.т.н.

При мікрохвильовому підведенні енергія надходить безпосередньо до молекул води в продукті, оскільки сухі речовини як правило радіопрозорі. Осередки пароутворення виникають у всьому об'ємі і виконують функцію гріючої поверхні. Таким чином, площа поверхні теплообміну повинна збільшуватись на порядки. Реалізується схема підведення енергії, яка показала високу ефективність у технологіях сушіння [3, 4].

*Постановка завдання.* Метою проведених досліджень було визначення впливу параметрів процесу (кількість підведеної енергії, тиск, поверхня випаровування) на швидкість видалення вологи з продукту і використання одержаних залежностей для побудови математичної моделі процесу і розробки інженерної методики розрахунку відповідного обладнання.

*Основна частина.* При експериментальному моделюванні мікрохвильової вакуум-випарки було проведено досліди для концентрування екстрактів стевії *Stevia Rebaudiana* – природного сахарозамінника, кавового екстракту, розчинів цукру і NaCl (рис. 1). Експерименти проводились під тиском 0,009...0,011 МПа, температура процесу не перевищувала 50 °С.

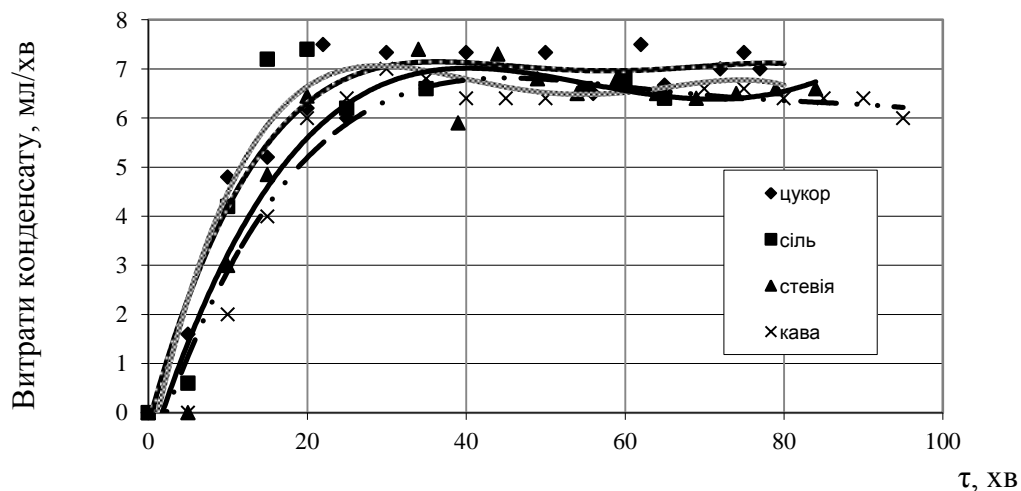


Рис. 1. Залежність витрат конденсату від складу розчину.

Як видно з графіків, різниця витрат конденсату для розглянутих розчинів незначна. Таким чином, модельним розчином для вивчення впливу на кінетику концентрування параметрів процесу в апараті, було обрано цукровий розчин початковою концентрацією 5 %.

Збільшення кількості підведеної до продукту енергії збільшує швидкість процесу, оскільки зростає кількість осередків пароутворення (Рис. 2). Експерименти проводились під тиском 0,009...0,011 МПа.

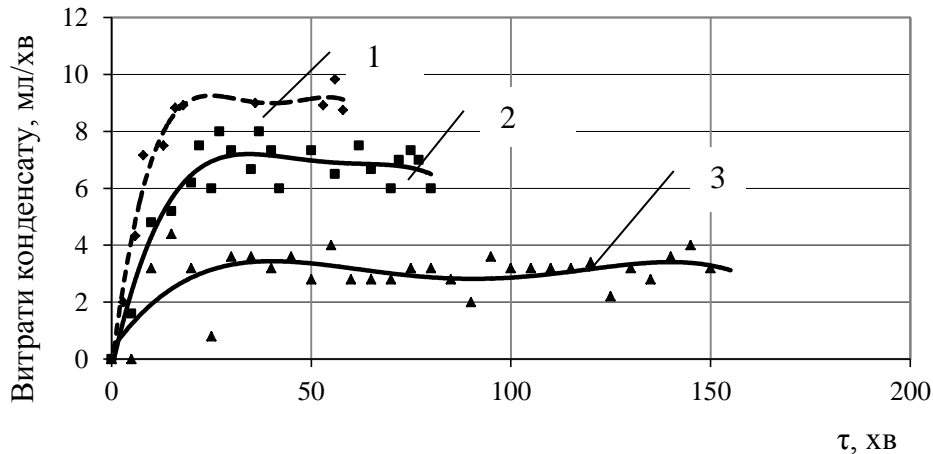


Рис. 2. Вплив питомого енергопідведення на витрати конденсату: 1 – 570 Вт/кг; 2 – 495 Вт/кг; 3 – 296 Вт/кг.

Проте під час аналізу термограм процесу (рис. 3) встановлено, що при потужності 570 Вт/кг температура продукту постійно зростає. Це вказує на те, що не вся підведена енергія витрачається на випаровування води, відповідно такий режим не є енергетично ефективним.

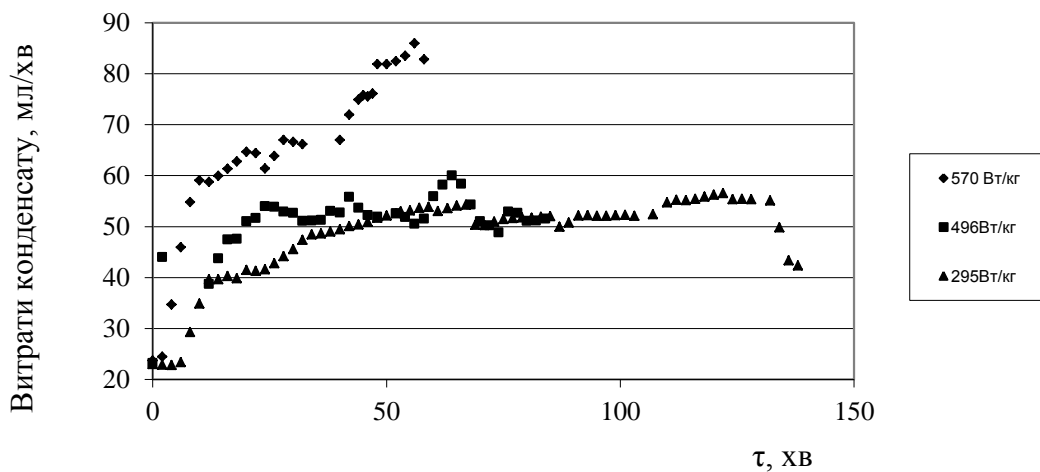


Рис. 3. Термограми процесу концентрування в залежності від питомого енергопідведення.

Відмічено, що у всіх дослідах витрати конденсату протягом 10...20 хвилин сягали постійних значень, тобто апарат виходить на стаціонарний режим. Таким чином, наглядно оцінити вплив параметрів процесу на інтенсивність концентрування, можна ввівши поняття середніх витрат конденсату (рис. 4).

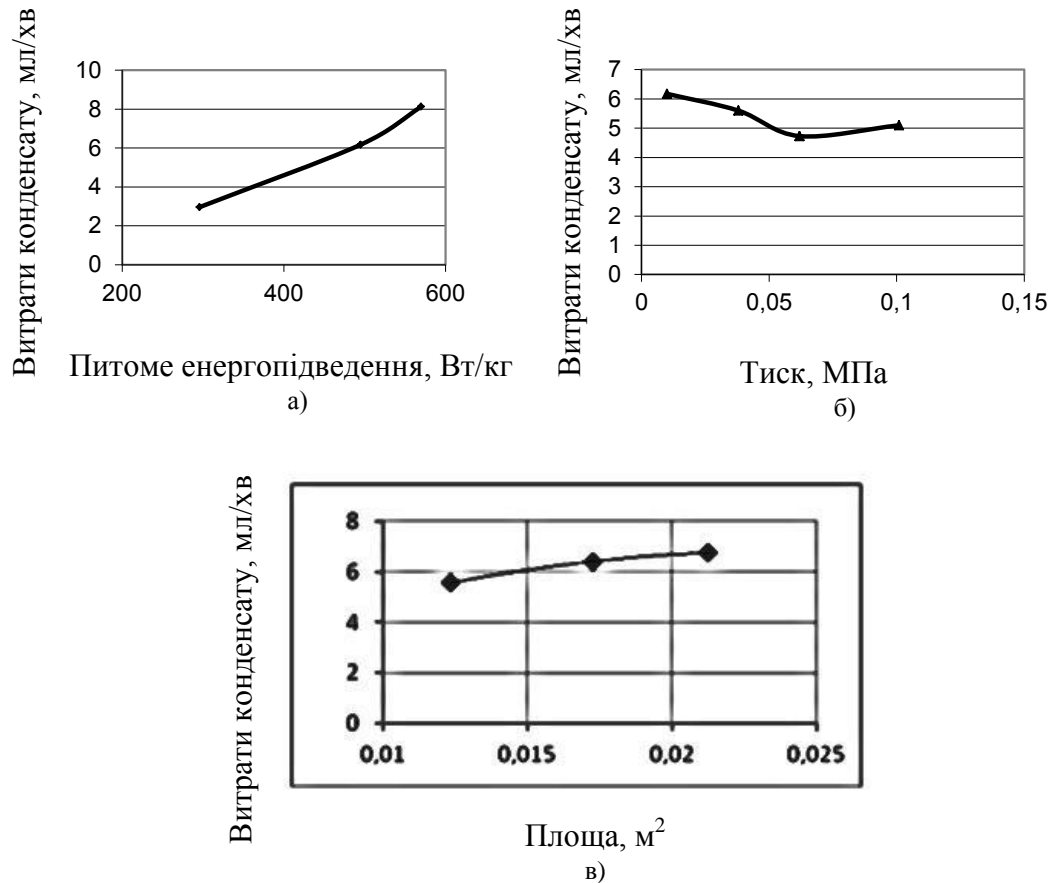


Рис. 4. Вплив параметрів процесу на витрати конденсату: а) питоме енергопідведення; б) тиск; в) площа поверхні випарювання.

Вивчення впливу тиску в апараті і площі поверхні випаровування проводилось за питомого енергопідведення 495 Вт/кг. Встановлено, що збільшення поверхні випаровування при постійному об'ємі продукту веде до збільшення витрат конденсату.

Одержана база експериментальних даних була використана для побудови математичної моделі процесу.

Швидкість протікання процесів випарювання в умовах мікрохвильового підведення енергії, визначається складними взаємодіями багатьох факторів, врахувати які в одній універсальній для всіх випадків моделі неможливо.

Отримати структуру критеріального рівняння для розрахунку мікрохвильових вакуум-випарних апаратів періодичної дії, можна методом аналізу розмірностей [5].

В загальному вигляді на продуктивність апарату за конденсатом  $\nu$  впливають кількість підведеної мікрохвильової енергії  $N$ , питома теплота пароутворення розчинника, який видається  $r$ , густина розчинника  $\rho$ , площа дзеркала продукту в апараті  $S$ , рівень продукту в апараті  $h$ , об'єм продукту  $V_{np}$ , тиск в апараті та навколишньому середовищі  $P$  та  $P_0$ . Тоді отримуємо наступну залежність у загальному вигляді

$$v = f(N, r, \rho, S, h, V_{np}, P, P_0). \quad (1)$$

Перелік параметрів наведено у табл. 1. Всі параметри складаються з трьох основних розмірностей: довжини (м), маси (кг) та часу (с). Скориставшись аналізом розмірностей, можна функцію (1) замінити залежністю між критеріями подібності. За  $\pi$ -теоревою визначаємо кількість безрозмірних комплексів, які описують процес. Оскільки число змінних  $n = 9$ , число одиниць виміру  $m = 3$ , кількість безрозмірних комплексів, що описують процес дорівнює  $(n - m) = 6$ .

Таблиця 1 – Список параметрів

Параметр	Символ	Розмірність
Продуктивність установки за конденсатом	$v$	$\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
Густина розчинника	$\rho$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
Площа поверхні продукту	$S$	$\text{м}^2$
Рівень продукту в апараті	$h$	$\text{м}$
Тиск в апараті	$P$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Базовий тиск	$P_0$	$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Потужність мікрохвильового поля	$N$	$\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$
Об'єм продукту	$V_{np}$	$\text{м}^3$
Питома теплота пароутворення розчинника	$r$	$\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$

Наведемо функцію у степеневому вигляді

$$v = A N^a r^b \rho^c S^d h^e V_{np}^f P^g P_0^n. \quad (2)$$

Складаємо рівняння розмірностей

$$\frac{\text{м}^3}{\text{с}} = \left( \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3} \right)^a \cdot \left( \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right)^b \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)^c \cdot (\text{м}^2)^d \cdot (\text{м})^e \cdot (\text{м}^3)^f \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^g \cdot \left( \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}^2} \right)^n. \quad (3)$$

Складаємо матрицю розмірностей для рівняння (2)

Таблиця 2 – Матриця розмірностей

	$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$	$g$	$n$	$v$
м	2	2	-3	2	1	3	-1	-1	3
кг	1		1				1	-1	0
с	-3	-2					-2	-2	-1

Складаємо систему рівнянь для основних одиниць

$$\begin{array}{l|l} \text{кг} & 3 = 2a + 2b - 3c + 2d + e + 3f - g - n \\ \text{с} & -1 = -3a - 2b - 2g - 2n \\ \text{м} & 0 = a + c + g - n \end{array}$$

В цій системі є 8 невідомих. Будь які три з них можна виразити через четверту. Так у другому рівнянні виражаємо через інші множники

$$n = a + c + g.$$

З третього рівняння знайдемо  $e$ , і підставивши  $d$  отримаємо

$$b = -2,5a - 2g - c + 0,5.$$

З першого рівняння

$$e = 2 + 2a + 2g + 4c - 2d - 3f.$$

Перепишемо рівняння (2) в наступному вигляді

$$v = A \cdot N^a, r^{-2,5a-2g-c+0,5}, \rho^c, S^d, h^{2+2a+2g+4c-2d-3f}, V^f, P^g, P_a^{a+c+g}. \quad (4)$$

Об'єднуємо параметри за однаковими показниками ступіня

$$v \cdot r^{0,5} h^2 = A \cdot \left( \frac{N \cdot h^2 \cdot P_a}{r^{2,5}} \right)^a \cdot \left( \frac{\rho \cdot h^4 \cdot P_a}{r} \right)^c \cdot \left( \frac{S}{h^2} \right)^d \cdot \left( \frac{V}{h^3} \right)^f \cdot \left( \frac{P \cdot P_a \cdot h^2}{r^2} \right)^g. \quad (5)$$

Комплекси, отримані у рівнянні (5), використовуємо для пошуку комбінацій, які дадуть структуру критеріального рівняння

$$\frac{h^2 \cdot r^{0,5}}{v} \cdot \frac{N \cdot h^2 \cdot P_a}{r^{2,5}} \cdot \frac{r}{\rho \cdot h^4 \cdot P_a} = \frac{N}{v \cdot r \cdot \rho} = \text{Bu}, \quad (6)$$

$$\left( \frac{S}{h^2} \right) \cdot \left( \frac{h^3}{V} \right) = \frac{S \cdot h}{V} = \text{F}. \quad (7)$$

Комплекс F – враховує вплив площі поверхні пароутворення.

Вплив тиску враховується комбінацією

$$\left( \frac{P \cdot P_a \cdot h^2}{r^2} \right) \cdot \left( \frac{P_a^2}{r^2} \right) = \frac{P}{P_a}. \quad (8)$$

Таким чином, із застосуванням чисел подібності, отримуємо наступне рівняння

$$\text{Bu} = A \cdot (F)^n \cdot \left( \frac{P}{P_a} \right)^m. \quad (9)$$

Константи  $A$ ,  $n$ ,  $m$  визначаються експериментально.

Обробка масиву експериментальних даних дозволяє рекомендувати для розрахунку процесу випарювання у мікрохвильовому вакуум-випарному апараті наступне рівняння

$$\text{Bu} = 4,3258 \cdot F^{-1,9338} \cdot \frac{P^{0,1226}}{P_a}. \quad (10)$$

*Висновки.* Встановлено, що на інтенсивність випарювання, окрім енергопідведення і тиску, також впливає площа поверхні випаровування. Температура продукту, який концентрують, залежить

не тільки від тиску в апараті, але й від кількості підведеної енергії і може значно перевищувати температуру кипіння.

Структуру критеріального рівняння визначено методом «аналізу розмірностей». Число енергетичної дії, яке встановлює співвідношення потужності мікрохвильового поля та енергії, яка необхідна для переведення розчину в пару, визначається безрозмірним критерієм площі та безрозмірним тиском в апараті. У результаті обробки експериментальних даних, визначено коефіцієнти критеріального рівняння. Визначальний вплив на інтенсивність випарювання чинять потужність електромагнітного поля та площа поверхні випаровування.

Література:

1. Бурдо О.Г. Исследование вакуум-выпарных аппаратов нового типа / Бурдо О.Г., Ружицкая Н.В., Макаренко Т.А., Малашевич С.А. // Наукові праці ОНАХТ. – Вип. 45, Т.2. – Одеса, 2014. – С.212–214
2. PHCOG REV.: Microwave Assisted Extraction – An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research [Text] / Vivecananda Mandal, Yogesh Mohan, S. Hemalatha // Pharmacognosy Reviews, Vol.1, Issue 1, Jan-May, 2007, P. 7 – 18.
3. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. – Одесса: «Полиграф», 2010. – 368 с.
4. Бурдо О.Г. Исследование модуля ленточной сушилки растительного сырья с комбинированным электромагнитным подводом энергии / Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Ружицкая Н.В.// Труды IV Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов СЭТТ-2011)». – Т.1, Москва, 2011. – С. 422 – 426.
5. Бурдо О.Г., Калинин Л.Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: Учебник. – Одесса: Друк, 2008. – 348с.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ САХАРНЫХ РАСТВОРОВ В МИКРОВОЛНОВОМ ВАКУУМ- ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ**

О.Г. Бурдо, Т.А. Резниченко, Н.В. Ружицкая

**Аннотация – в статье для интенсификации процесса вакуум-выпарки предложено обеспечить равномерность энергоподвода и исключить промежуточный теплоноситель за счет использования микроволновых технологий. Приведены результаты экспериментальных исследований концентрирования экстрактов**

стевиин, кофе, растворов сахара и NaCl. Показано влияние удельного энергоподвода, давления в аппарате, площади поверхности испарения на интенсивность процесса концентрирования пищевых продуктов на примере раствора сахара. Получено критериальное уравнение периодического процесса вакуум-выпарки в условиях действия микроволнового поля.

## MODELING OF PROCESS OF SUGAR SOLUTIONS CONCENTRATION IN MICROWAVE VACUUM EVAPORATOR

O. Burdo, T. Reznychenko, N. Ruzhitska

### *Summary*

In current paper for vacuum-vaporization process intensification it is offered to provide energy supply uniformity and exclude intermediate heat medium by using of microwave technologies. The results of experimental researches of concentration of stevia, coffee extracts, sugar and NaCl solutions are given. The influence of specific energy supply, pressure in the apparatus, evaporation surface area on food products concentration process is shown on the example of sugar solution. The criterion equation of periodical vacuum-vaporization process under microwave field action conditions is obtained.