

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОНЦЕНТРУВАННЯ СОКІВ**

Бурдо Олег Григорович д.т.н., професор
Бурдо Алла Костянтинівна к.т.н., доцент
Одеська національна академія харчових технологій
Давар Ростами Пур
Фирма D.R.P., Іран, Тегеран
Burdo O.
Burdo A.
Odessa national academy of food technologies
Davar Rostami Pur
Firm D.R.P., Iran, Teheran

Анотація: показана енергетична та технологічна перспектива концентрування соків у мікрохвильових випарних апаратах. Наведена математична модель процесу випаровування у мікрохвильовому полі. Представлено схему та завдання експериментальних досліджень. Аналізуються результати експериментів, що отримані на соках із гранату та ехінацеї. Проведено узагальнення дослідних даних у вигляді критеріальної моделі. Доказана запропонована гіпотеза, щодо інноваційної технології випаровування, яка дозволяє вдвічі підвищити кінцеву концентрацію продукту при температурах до 35 °C та низьких витратах енергії.

Ключові слова: мікрохвильове випаровування, математичне моделювання, гранатовий сік, енергоефективність.

Вступ

Концепція здорового, функціонального харчування визначає вплив якості їжі на підтримку здоров'я людини та здатності до праці. Вперше таку концепцію було запроваджено у 1980 році в Японії, і як результат – найбільша в світі тривалість життя [1, 2]. Важливе місце в раціоні харчування займають соки [3, 4]. Соки достатньо популярні напої в Україні. Щоденно сік купують більш 20 % українців. Поширюється попит на соки, які слабо представлені в торгівлі. В першу чергу це сік з плодів гранату [4].

Формулювання проблемита наукової гіпотези

Концентрований сік приваблює такими властивостями: він краще зберігає свою харчову цінність, займає менше місця при зберіганні та зменшує витрати при транспортуванні. Ці фактори важливі при виробництві та при експортних та імпорتنих операціях із гранатовим соком.

В традиційних технологіях воду із соку прямого вичавлювання вилучають в вакуум випарних апаратах. Саме тут виявляються науково-технічні протиріччя між зростаючими вимогами до якості харчового продукту, енергоємністю його виробництва та технікою теплопередачі. Застосування простих засобів для інтенсифікації процесів тепло переносу у вакуумних апаратах проблематично. Тому на практиці обмежуються значеннями кінцевих концентрацій продукту, які визначаються за термодинамічними та економічними факторами. Для гранатового соку це значення 65 °brix.

Для вирішення наведеного протиріччя пропонується гіпотеза: «відмінності в електрофізичних властивостях складових розчину може бути використано для направлено підведення електромагнітної енергії безпосередньо до води, що дозволить ефективно витратити енергію тільки на фазовий перехід, а це вирішить всі проблеми, пов'язані із теплопередачею в розчинах, які згущуються».

Аналіз основних досліджень і публікацій

Сокам присвячено широке коло науково-технічної літератури [5-6]. Для значного виду соків досліджено питання їх властивостей, технологій виробництва, медичні та лікувально-профілактичні аспекти. Ключовими факторами, які впливають на стабільність продукту є температура, кисень, рН, світло [5]. Відомо, що антиоксидантний потенціал гранатового соку вищий, ніж у червоного вина та зеленого чаю [5]. Але є серйозні технологічні регламентації при переробці гранатових плодів. Особливо такі вимоги важливі при виробництві концентрованих соків. Традиційно концентрат гранатового соку отримують термічним методом. Незважаючи на простоту техніки випаровування, традиційні технології не відповідають сучасним вимогам до якості концентрованого соку. Наразі, з'явилися дослідження про використання мікрохвильових технологій для згущення харчових рідин [7].



Мета дослідження

В роботі поставлено за мету створити вакуумний випарний апарат на основі мікрохвильового поля для концентрування гранатового соку. Апарат має ефективно використовувати енергію при мінімальному термічному впливі на сировину та забезпечити максимальне зберігання її поживного потенціалу і гарантувати високу якість концентрату.

Результати дослідження

Наразі, реалізація запропонованої гіпотези потребує дорогого ресурсу – електричної енергії, а це вимагає оцінки енергетичної ефективності схеми, порівняння її з традиційними тепло технологіями. Тому, на першому етапі проведемо енергетичний аналіз технології мікрохвильового випаровування.

Порівняємо теплофізичні моделі традиційного та мікрохвильового випарних апаратів. В класичній схемі переніс енергії від теплоносія, яким є водяна пара, до продукту здійснюється шляхом теплопередачі. При вилученні із розчину пари підвищується його концентрація, зростає його в'язкість та зменшується ефективність системи теплопередачі. На поверхні теплопередачі зі сторони продукту формується приграничний шар, товщина якого з часом зростає. При цьому, цей шар має найбільш концентрований продукт, тому його термічний опір поступово зростає. Простих рішень по впливу на значення термічного опору приграничного шару немає. Саме тут має місце локальний перегрів продукту, з'являється смак варки, або пригар. Зменшується продуктивність апарату. В інноваційному мікрохвильовому апараті мають місце інші процеси (рис.1).

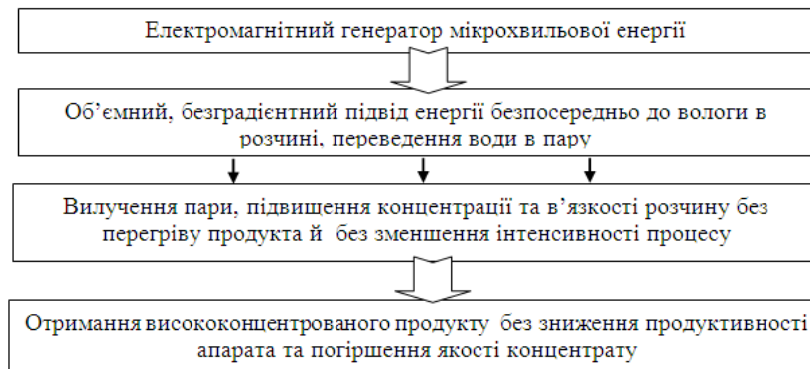


Рис. 1. Теплофізична модель інноваційного мікрохвильового випарного апарата

Механізм вилучення вологи наступний. Електромагнітне поле впливає на полярні молекули (воду). Дисипація енергії поля приводить до переведення води в інший фазовий стан – в пару. Класична теплопередача тут відсутня, що є передмовою для отримання концентрованого і якісного продукту. Відсутність локальних перегрівів гарантує проведення процесу при мінімальному термічному впливі. Розглянуті схеми використовують різні види енергії, тому проведемо аналіз ефективності використання первинного джерела – палива, витрати якого приймемо за 100 %. Використаємо методологію енергетичного менеджменту[8], яка базується на системному аналізі всієї схеми «первинне паливо – його трансформації у відповідні види енергії – розподільна мережа - користувач».

Відомо, що в традиційних схемах тільки 50 % енергії палива надходить до випарного апарату. Ще втрачається більше половини енергії водяної пари у випарному апараті та в сушарці і корисна енергія становить 22 % від енергії первинного палива.

Конверсія енергії в інноваційному випарному апараті наступна. Відомо, що ККД електростанції в схемі «паливо – електрична енергія» становить 32 %. Після врахування втрат енергії у випарному мікрохвильовому апараті корисна енергія палива становить 28 %, що більше ніж в традиційному апараті. Для концентрованих соків першим пріоритетом є максимальне збереження поживних ресурсів сировини. В цьому випадку традиційна випарка не в змозі конкурувати із запропонованою установкою.

Основою математичної моделі процесів випаровування є параметрична схема процесу, яка встановлює функціональну залежність груп вхідних параметрів та параметрів якості процесу (рис.2). За параметри якості беремо кінцеву концентрацію соку (X_k) та питомі витрати енергії на концентрування 1кг продукту (j , Дж/кг). Вхідними параметрами є теплофізичні властивості соку,



його розхід, початкові значення концентрації та температури. Конструктивні параметри апарата включають довжину, чи висоту (L), ширину, чи діаметр (B) та об'єм завантаження (Vп). Мікрохвильовий генератор (МХГ) має енергетичний ККД (ηе) та потужність (Ne).

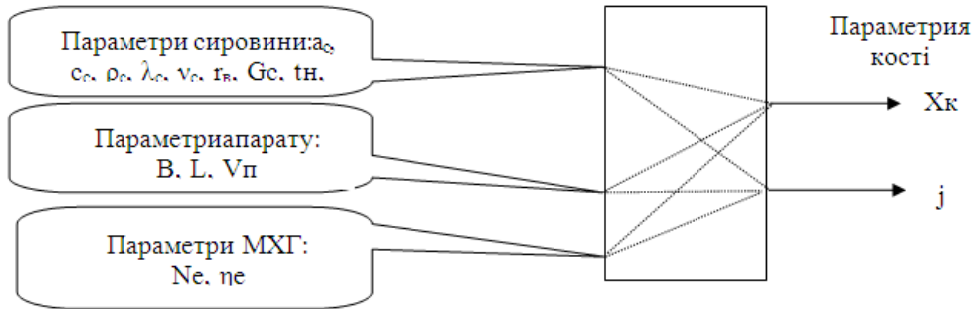


Рис. 2. Параметрична модель мікрохвильового випарного апарату

На базі схеми (рис.2) розроблена фізична модель апарата, яка є постановкою задачі математичного моделювання. Апарат має 3 зони. В першій зоні розміщено продукт, об'єм якого V_1 . Енергія $N\eta\tau$ підводиться до всього об'єму продукту за граничних умов (ГУ) Пірота, в діапазоні радіусів $0 \leq r \leq r_1$ та висоти $0 \leq Z \leq Z_1$. На етапі 1 рідина нагрівається, а на другому – випаровується.

Друга зона має об'єм V_2 , температури – t_2 та обмеження: $0 \leq r \leq r_1$; $Z_1 \leq Z \leq Z_2$. Друга зона заповнена водяною парою, підвід енергії тут відсутній. Третя зона – радіопрозорий корпус апарата, об'єму, в якому здійснюється процес випаровування.

Записав перший закон термодинаміки та рівняння Фур'є – Кірхгофа, які відображають теплові взаємодії між елементами системи, що аналізується, враховуючи, що робота в системі відсутня, отримано:

$$c_{v\rho} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v . \quad (1)$$

Рівняння (1) встановлює зв'язок між зміною температури за часом в будь-якій точці об'єму. При незмінній теплопровідності рівняння (1) спрощується та приводиться до лінійного диференційного рівняння в часткових похідних другого параболічного типу. Загальні закономірності (1) дозволяють конкретизувати моделі для кожної з трьох зон апарата. Так, для 1 зони відомо: об'єм продукту V_1 ; енергія, що поглинається продуктом $N\eta\tau$; температури – t_1 . Процес здійснюється в межах тисків $P_a \leq P \leq P_n$. Окреморозглядаються 2 етапи: нагрівання рідини від початкової температури $t_1 = t_n$ до температури випаровування $t_1 = t_n$, та другий етап - безпосередньо випарка.

На першому етапі вихід пари відсутній ($W = 0$), тому вся енергія йде тільки на підвищення температури розчину.

Для висот $0 \leq Z \leq Z_1$; радіусів $0 \leq r \leq r_1$:

початкові умови ($\tau = 0$): $t_1 = t_n$; $V_1 = V_n$.

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_{v\rho_1}} , \quad (2)$$

де $a = \lambda / (c_v \rho)$ – ізохорична температуропровідність, m^2/s .

Другий етап характеризується сталою температурою фазового перетворення ($t_n = const$), а підведена енергія ($N\eta\tau$) витрачається на підвищення внутрішньої енергії продукту при зміні теплоємності, переходу води у пару. Результатом цього є підвищення концентрації соку. Рівняння енергії прийме вид:

$$\dots \quad (3)$$

Поточний об'єм соку знаходиться з рівняння матеріального балансу:

$$V_1(\tau) = V_n - V_n(\tau) \quad (4)$$

А границі першої та другої зон при випарці ГУ 1 рода: $t = t_n = const$.

На границі 1 і 3 зон (для основного періоду - випаровування) ГУ 3 рода

$$\dots \quad (5)$$

Аналогічно записано рівняння енергії, початкові та граничні умови із відповідними індексами для зон 2 та 3. Таким чином отримано систему рівнянь, що є математичною моделлю випаровування



у електромагнітному полі. В співвідношеннях (1) – (5) прийнято: η – коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності; N – потужність електромагнітного генератора; η – ККД магнетрона; τ – тривалість процесу; індекси 1 – рідка фаза; 2 – пара; 3 – поверхня реакційного об'єму.

Але практична реалізація наведеної моделі складна. Проведемо її спрощення, модифікуємо її залучив методи теорії подібності. Продуктивність випарного апарата (рис.2) визначається потужністю генераторів (N); об'ємом сировини (V_c), та об'ємом в ньому води (V_v); теплофізичними властивостями води, ключова з яких питома теплота пароутворення (r). Співвідношення енергії, що необхідна в базовій технології (Q_0), та енергії, що витрачається в запропонованій (N), враховується числом енергетичної дії, числом Бурдо (Bu). Тоді:

$$\text{та} \quad \text{---} \quad (6)$$

а поточна продуктивність апарата визначається по моделі:

$$\text{---} \quad (7)$$

Безрозмірна продуктивність апарата (W) має сенс відношення поточної продуктивності (W_u) до базової (прийнято, $W_0 = 1 \text{ г/с}$). В моделі (7) вважається, що гідродинамічний приграничний шар відсутній, а це нівелює вплив в'язкості розчину на процес випаровування.

Експериментальні дослідження проведено на стенді, основними вузлами якого є: випарна камера, конденсатор, збірник конденсату та вимірювально-обчислювальний комплекс. Пара із камери подавалась в конденсатор, маса конденсату визначалась електронними вагами ТВЕ-0,21-0,01. Температури пари та продукту вимірювались датчиками типу DallasDS 18b20. Інформація з ваг та датчиків температури через інтерфейс збиралась на планшет CHUWICW1506. Розроблена програма обробляла бази даних та відображала на екрані дисплея термограми, поточні значення вилучення води та миттєві швидкості вилучення води (% в хвилину). Блок управління мав таймер та регулятор потужності магнетрону. Режим роботи конденсатору стабілізувався водоохолоджувачем з парокомпресійною холодильною машиною. Рівень вакууму контролювався зразковим вакуумметром.

Досліджувались соки з гранату та ехінацеї. В дослідях (рис. 3) використано сік, що вже закінчив згущення на традиційній вакуум випарній установці і мав початкову концентрацію 65 °brix.

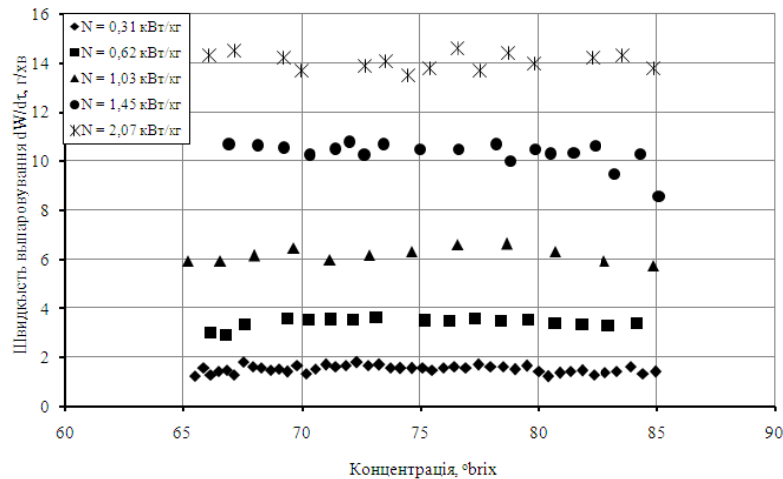


Рис. 3. Залежність продуктивності від питомої потужності та концентрації гранатового соку

Ставилась в цій серії дослідів завдання доказати, що запропонована технологія спроможна на подальше ефективне підвищення концентрації. Результати (рис.3) доказують, що апарат надійно функціонує на високих концентраціях гранатового соку. Температура пари на виході із камери не перевищувала 35 °С, що гарантує збереження поживного ресурсу сировини. Всього було оброблено понад 300 дослідів випаровування гранатового соку та соку ехінацеї в діапазоні концентрацій 10 – 85 °brix, узагальнення яких визначило критеріальне рівняння:

$$W = \frac{W_u}{W_0} = 0.76 * Bu^{1.13} \quad (8)$$

Рівняння (8) дозволяє з похибкою не більше 20 % розраховувати продуктивність розробленого мікрохвильового вакуум випарного апарата в діапазоні чисел енергетичної дії 0,4



Висновки

Доказана гіпотеза про можливість направленої підведення енергії до води у розчинах, що виключає процес формування приграничного шару та перегріву в об'ємі розчину, що концентрується. Процес згущення проходить без традиційної теплопередачі. Мікрохвильові вакуум випарні апарати спроможні забезпечити кінцеву концентрацію в 1,5...2 рази вищі, ніж традиційні. Температура концентрування не перевищує 35 °C та протікає при стабільних параметрах паропроодуктивності.

Список літератури

1. Осипова Л.А. Функциональные напитки /Осипова Л.А., Капельяню Л.В., Бурдо О.Г. Одесса «Друк», 2007.-288с.
2. Капельяню Л.В. Функциональні продукти /Л.В.Капельяню, К.Г.Іоргачова.- О.: Друк, 2003.- 233с.
3. Lucas J. EU-funded research in functional foods //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
4. Milner J.A. Functional foods and health: a US perspective // British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
5. Fisher U.A. Kammerer thermal stability of anthocyanins and colourless phenolics in pomegranate (*Punica granatum* L) juices and model solutions /U.A. Fisher, R. Carle and R. Dietmar //Food Chemistry. — 2013. — vol. 138. — issues 2—3. — p. 1800—1809.
6. Karnan M. Effects of processing method and storage temperature on clear pomegranate juice turbidity and color /M. Karnan, N. Tetik and I. Turnan //Food Processing and Preservation. — 2013. — vol. 37. — issue 5. — p. 899—906.
7. Бурдо О.Г., Пищевые нанотехнологии – Херсон, 2013 – 294с.
8. Бурдо О.Г. Энергетический мониторинг пищевых производств – Одесса: Полиграф, 2008 – 244с.

References

1. Osipova L.A. Funktsionalnyie napitki /Osipova L.A., Kapelyants L.V., Burdo O.G. Odessa «Druk», 2007.- 288s
2. Kapelyants L.V. FunktsionalniI produkty /L.V.Kapelyants, K.G.Iorgachova.- O.: Druk, 2003.- 233s.
3. Lucas J. EU-funded research in functional foods //British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
4. Milner J.A. Functional foods and health: a US perspective // British J. Nutrition. 2002.- V.88. Suppl.2.1 – 131-132.
5. Fisher U.A. Kammerer thermal stability of anthocyanins and colourless phenolics in pomegranate (*Punica granatum* L) juices and model solutions /U.A. Fisher, R. Carle and R. Dietmar //Food Chemistry. — 2013. — vol. 138. — issues 2—3. — p. 1800—1809.
6. Karnan M. Effects of processing method and storage temperature on clear pomegranate juice turbidity and color /M. Karnan, N. Tetik and I. Turnan //Food Processing and Preservation. — 2013. — vol. 37. — issue 5. — p. 899—906.
7. Burdo O.G., Pischevyie nanoenergetehnologii – Herson, 2013 – 294s.
8. Burdo O.G. Energeticheskiy monitoring pischevyih proizvodstv – Odessa: Poligraf, 2008 – 244s.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СОКОВ

Аннотація: показана енергетическая и технологическая перспектива концентрирования соков в микроволновых выпарных аппаратах. Приведена математическая модель процесса испарения в микроволновом поле. Представлена схема и задачи экспериментальных исследований. Анализируются результаты экспериментов, полученные на соках граната и эхинацеи. Проведено обобщение опытных данных в виде критериальной модели. Доказана предложенная гипотеза, по инновационной технологии выпарки, которая позволяет вдвое повысить конечную концентрацию продукта при температурах до 35 °C и низких затратах энергии.

Ключевые слова: микроволновая выпарка, математическое моделирование, гранатовый сок, энергоэффективность.

RESEARCH PROCESS OF CONCENTRATION JUICE

Summari: the energy and technological perspective of concentrating juices in microwave evaporators is shown. A mathematical model of evaporation process in a microwave field is given. The scheme and problems of experimental researches are presented. The results of experiments on pomegranate and echinacea juices are analyzed. The experimental data in the form of a criterial model are generalized. The proposed hypothesis of innovative evaporation technology, which allows to double the final concentration of the product at temperatures up to 35 °C and low energy costs is proved.

Keywords: microwave residue, mathematical modeling, pomegranate juice, energy efficiency.