

ІННОВАЦІЙНІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ДЕГІДРАТОРИ ДЛЯ КОНЦЕНТРУВАННЯ РОЗЧИНІВ

Сиротюк І.В., PhD, доцент, Славинська В.О., інженер, Петровський В.В., аспірант
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. Сучасний розвиток технологій зневоднення харчової сировини направлений на вирішення одного з головних протиріч виробництва харчокоцентратів, а саме підвищення якості продукту при зниженні енерговитрат на сам процес. Проведено аналіз традиційного обладнання для зневоднення харчових розчинів. Визначено недоліки сучасних технологій випаровування, серед яких особливої уваги заслуговують відсутність можливості отримання високих концентрацій без завдання шкоди поживній цінності готового продукту та довготривале термічне навантаження на сировину. Обґрунтовано перспективність технологій адресної доставки енергії при зневодненні рідких харчових систем, які б дали змогу вирішити ці проблеми. Інструментом реалізації таких технологій визначено електромагнітні джерела енергії мікрохвильового діапазону. Наведено схему експериментального стенду та результати дослідження впливу потужності поля, концентрації та виду сировини на інтенсивність паропроодуктивності. Визначено вимоги до основних вузлів дегідратору. Проведено апробацію модуля дегідратору при концентруванні томатної пасти. В результаті було встановлено, що паропроодуктивність модуля є сталою на протязі всього процесу зневоднення. Доказано ефективність модуля, можливість в разі підвищити концентрацію готового продукту при збереженні його якості. Запропонована методика розрахунку та оптимізації мікрохвильових дегідраторів. Наведено приклад розрахунку кінетики концентрування водних розчинів у мікрохвильовому полі. Отримані результати свідчать про перспективність вищезазначених технологій зневоднення та наявність суттєвих сировинних та енергетичних резервів.

Ключові слова: концентрування, технології адресної доставки енергії, мікрохвильові системи, методи розрахунку дегідратору.

Вступ. Сучасний етап розвитку технологій АПК пов'язаний із вирішенням ключових проблем: підвищення якості готового продукту при зменшенні витрат енергії та навантаження на довкілля. Особливо це стосується енергоємного обладнання, що використовується для зневоднення харчової сировини – випарних апаратів [1, 2]. Перспективним шляхом удосконалення є інноваційні принципи адресного підведення енергії [3] з використанням електромагнітних джерел енергії мікрохвильового (МХ) діапазону. Але, в умовах виробництва приклади використання МХ випромінювання в процесі випарювання не відомі. Відсутні і алгоритми розрахунку МХ випарних апаратів. Особливо це стосується апаратів, що спроможні працювати у безперервному режимі, вирішувати завдання по збільшенню продуктивності обладнання. Тому в роботі поставлено задачу провести дослідження МХ вакуум-випарних апаратів, розробити методи їх проектування. Очікується, що реалізація принципів об'ємного підведення енергії безпосередньо до полярних молекул розчину відкриє нові можливості МХ апаратів. На відміну від традиційної техніки випаровування за принципами теплопередачі в пропозиції відсутні проблеми формування приграничного шару, а це має розширити діапазони кінцевих концентрацій готового продукту. Із-за таких особливостей автори в роботі використовують термін «дегідратор», що більш широко відображає специфіку процесів зневоднення.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми.

Вперше про особливі можливості взаємодії харчової сировини та електромагнітного поля надвисокої частоти було заявлено в роботі [4]. На основі фізичного, математичного та експериментального моделювання обґрунтовувались процеси суттєвої зміни структури сировини, навіть на мікро- та наномасштабних рівнях. Заявлялось про умови локального впливу на оболонку клітини, мікроорганізми, інші елементи, які включають полярні молекули. У подальшому аналітичні та експериментальні дослідження процесів обробки вологої харчової сировини у мікрохвильовому полі [5–7] підтвердили високу інтенсивність масообміну. Мікрохвильові системи дозволили удосконалити технології виробництва кави [8], концентратів гранатового соку [9]. Досліджено ефективність мікрохвильових систем при випаровуванні розчинів [10], при зневодненні зернових продуктів на стрічковій сушарці [11]. Ці роботи стали базою для створення основ теорії адресної доставки енергії до елементів харчової сировини.

Наразі, проблемами дослідження мікрохвильових технологій обробки харчової сировини в наукових лабораторіях світу активно займаються. Перспективи їх використання доказано при сушінні сировини [12, 13] при концентруванні [14–18], при екстрагуванні [19].

Таким чином, проведений критичний огляд визначив наступну проблему. Традиційні вакуум-випарні апарати із вільною циркуляцією розчину працюють по принципу теплопередачі. Із підвищенням концентрації розчину підвищується в'язкість, зростає товщина приграничного шару, росте термічний опір та градієнт

температур у приграничному шарі, з'являється присмак пригару. Продукт псується. Щоб не допустити погіршення якості продукту на практиці обмежуються значенням його кінцевої концентрації.

Приклади промислового використання мікрохвильових дегідраторів не відомі.

Вирішити цю проблему планується за технологіями адресної доставки енергії при об'ємному принципі її підведення [20].

Моделювання модуля дегідратору.

Конструкція елементів модуля дегідратора спрямована на вирішення технологічних завдань і виконана у відповідності до комплексних технічних вимог (таблиця 1).

Таблица 1

Технічні вимоги до модуля дегідратора

Елементи модуля	Технологічні задачі	Технічні вимоги і обмеження
Реактор	Забезпечення процесу зневоднення харчових рідин в умовах вакууму та за температур до 100°C	Радіопрозорість, працездатність в умовах вакууму і сумісність з харчовими розчинами
Вузол введення сировини і виведення концентрату і вторинної пари	Тепло- та гідродинамічні характеристики мають бути узгоджені відповідно до технологічного регламенту. Забезпечення руху потоків уникаючи їх перемішування	Відповідність умовам позамежного хвильоводу, працездатність в умовах вакууму і сумісність з харчовими розчинами
Корпус модуля	Витримувати силові навантаження. Відповідати необхідним рівням теплового захисту	Відповідність нормам електромагнітного захисту апарату
Вузол вводу МХ енергії	Параметри хвильоводу повинні забезпечувати максимальні ККД транспортування енергії	Відповідність вимогам електромагнітного захисту апарату
Система генерації МХ поля	Повинна бути передбачена можливість регулювання вихідної потужності магнетрона	Повинна бути забезпечена автономність та відсутність потреби у пристроях для охолодження силових електроніки

Основними конструктивними вузлами та елементами дегідратора є: металева шахта (1), що виконує функції резонаторної камери, в середині якої розміщується реактор (2), виконаний із радіо прозорого матеріалу. Реактор 2 заповнюється сировиною (розчином 3) (рис. 1).

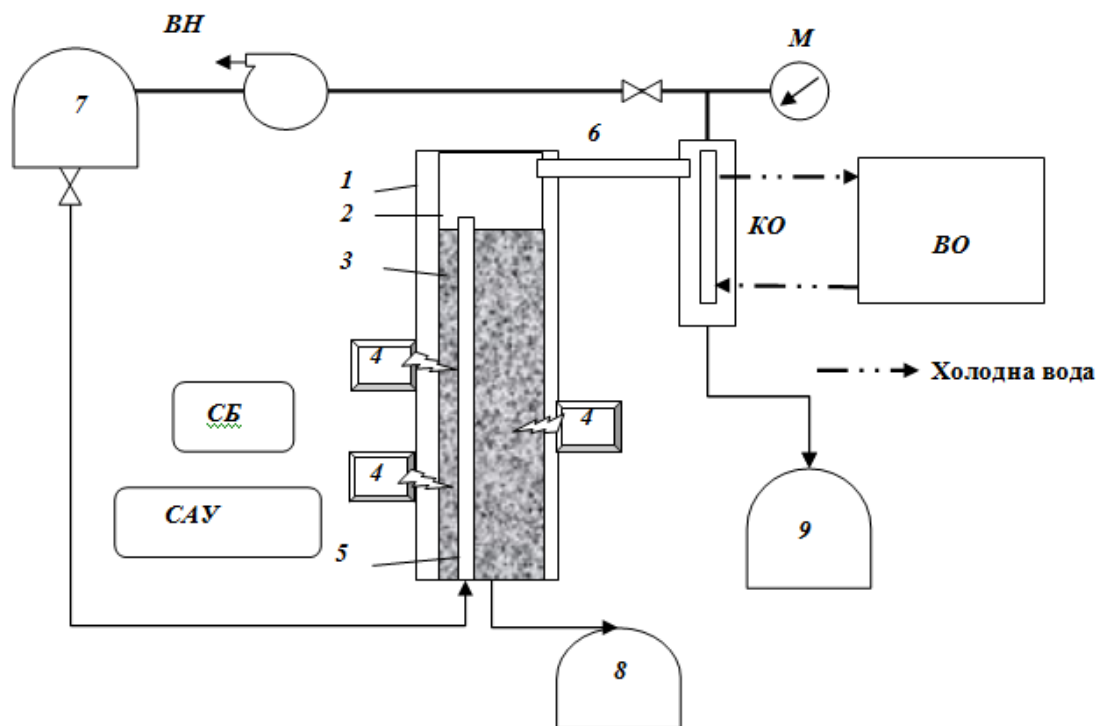


Рис. 1 – Схема експериментально-дослідного зразка дегідратора

На бокових стінках шахти встановлено електромагнітні аплікатори (4) мікрохвильового діапазону. Верхня та нижня кришки шахти (3) мають елементи захисту від витоків електромагнітної енергії за межі шахти. Герметизація реактора забезпечується спеціальними верхнім та нижнім фланцями, які мають штуцери для вводу сировини (5) та виходу концентрату та вторинної пари (6).

Вторинна пара із реактора (2) по каналу (6) поступає у конденсатор-охолоджувач (КО), в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача (ВО), який укомплектовано компресорно-конденсаторною холодильною машиною. Тиск в системі забезпечується вакуум-насосом (ВН). Сировина подається до реактору із ємності (7), концентрат збирається в ємність (8). Гідролат із (КО) збирається в ємність (9). Потужність аплікаторів регулюється блоком силової електроніки (СБ) по командах автоматизованої системи управління (САУ). На (САУ) встановлюється потужність кожного магнетрону, циклограма режиму роботи. На дисплеї (САУ) відображається поточна інформація: потужність, температури. Передбачено аварійне відключення дегідрататора при: відсутності циркуляції сировини, підвищення тиску та температури, електромагнітної небезпеки.

На бокових стінках шахти встановлено електромагнітні аплікатори (4) мікрохвильового діапазону. Верхня та нижня кришки шахти (3) мають елементи захисту від витоків електромагнітної енергії за межі шахти. Герметизація реактора забезпечується спеціальними верхнім та нижнім фланцями, які мають штуцери для вводу сировини (5) та виходу концентрату та вторинної пари (6).

Вторинна пара із реактора (2) по каналу (6) поступає у конденсатор-охолоджувач (КО), в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача (ВО), який укомплектовано компресорно-конденсаторною холодильною машиною. Тиск в системі забезпечується вакуум-насосом (ВН). Сировина подається до реактору із ємності (7), концентрат збирається в ємність (8). Гідролат із (КО) збирається в ємність (9). Потужність аплікаторів регулюється блоком силової електроніки (СБ) по командах автоматизованої системи управління (САУ). На (САУ) встановлюється потужність кожного магнетрону, циклограма режиму роботи. На дисплеї (САУ) відображається поточна інформація: потужність, температури. Передбачено аварійне відключення дегідрататора при: відсутності циркуляції сировини, підвищення тиску та температури, електромагнітної небезпеки.

Основними показниками дегідрататора є: продуктивність по пару, кінцева концентрація готового продукту, питомі енергетичні витрати, харчова якість продукту та гідролату. Інноваційна установка має забезпечити наступні положення.

1. Значення паропроductивності має бути практично не залежним від концентрації в сировині вологи.

2. Основним фактором, який визначає величину паропроductивності, є вид розчинника, його прихована теплота фазового переходу та потужність магнетронів.

Параметри дегідрататора. Живлення – електрична мережа, 220В; потужність – 2 кВт; діапазон тисків 5–150 кПа; діапазон концентрацій готового продукту до 85–90%гріх; загальна продуктивність визначається загальною потужністю магнетронів.

При проведенні комплексних експериментальних досліджень були отримані результати, що відображені в таблиці 2.

Таблиця 2

Діапазон експериментальних даних при дегідrataції розчинів

Об'єкт	Розчинник	Тиск, кПа	Температура, °С	Потужність МХ поля, Вт	Концентрація розчину, %	
					Початкова	Кінцева
Розчин цукру	Вода	10	40 – 50	270	15	21
Яблучний сік	Вода	10	40 – 50	270	13,5	20
Кавовий екстракт	Вода	10	40 – 50	270	14,8	19
Біле вино	Вода (90%) Етанол (10%)	10	35 – 50	270	6,1	9,2
Дубовий екстракт	Вода (58%) Етанол (42%)	10	35 – 45	270	15,1	23,1

Результати досліджень наведено у вигляді графічних залежностей впливу типу сировини на ключові параметри процесу (рис. 2–4).

Аналіз експериментальних даних свідчить, що процес концентрування протікає при температурах до 50°C (рис. 2), ступінь підвищення концентрації стала (рис. 3), а паропроductивність визначається значенням теплоти пароутворення розчинника (рис. 4). В результаті, шляхом комплексних стендових досліджень було встановлено статичні та кінетичні характеристики експериментальної конструкції модуля МХ дегідрататора.

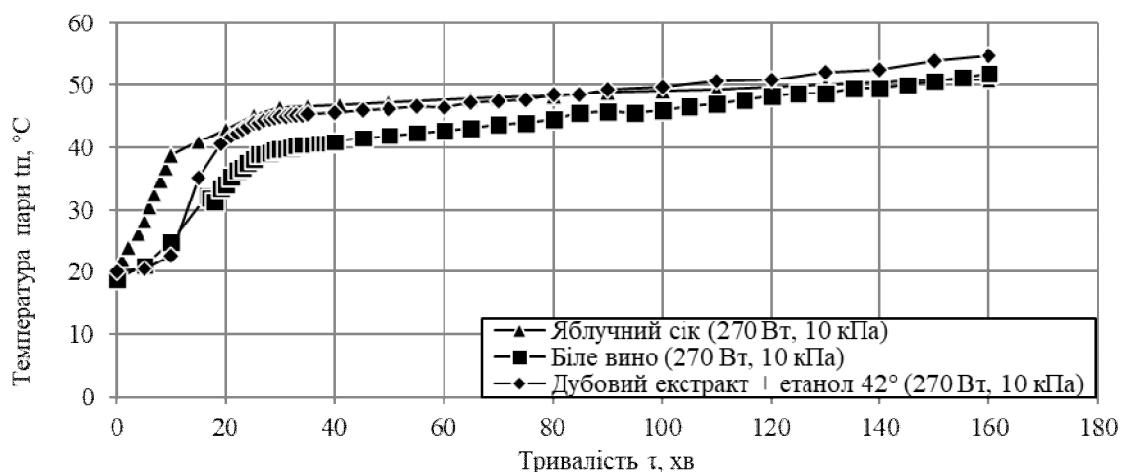


Рис. 2 – Термограми пари на виході із дегідратору

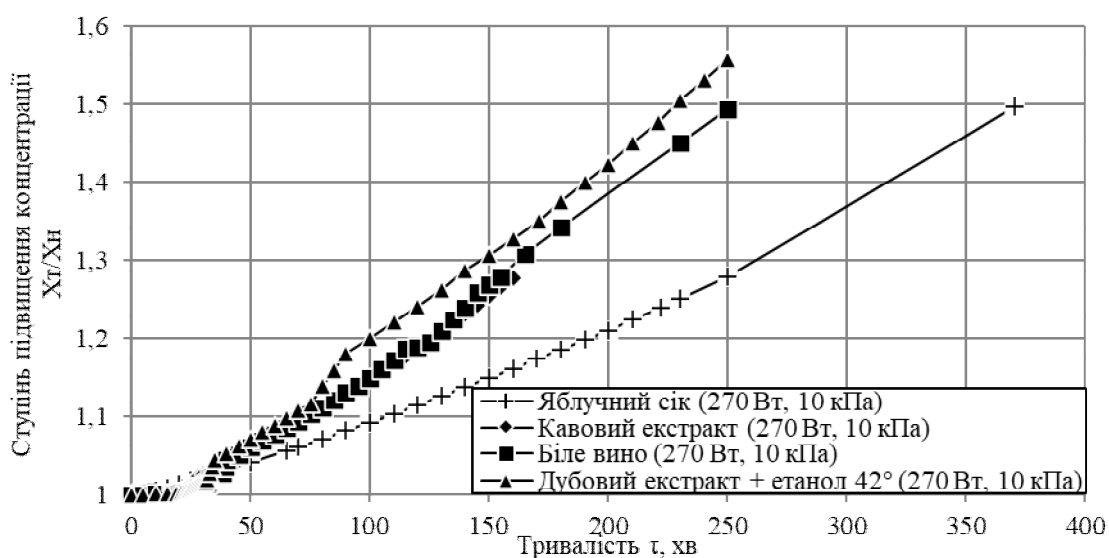


Рис. 3 – Вплив виду продукту на ступень підвищення концентрації

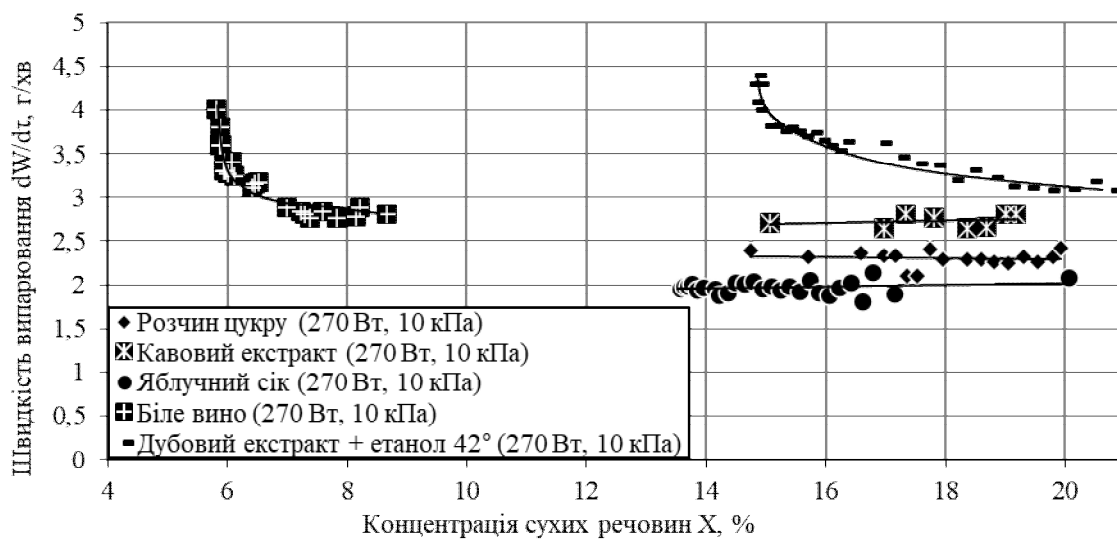


Рис. 4 – Вплив виду продукту на паропроодуктивність

Ефективність МХ дегідратору розглянемо на прикладі удосконалення технології виробництва томатної пасти. Це один із найбільш проблемних продуктів консервної галузі. В традиційних лініях після мийки відкальібровані помідори потрапляють до подрібнювача з метою розрізання овочів на дрібні частини, після

чого отримана сировина перетирається у гомогенну масу. Потім отримана маса потрапляє до вакуум-випарної установки задля подальшого концентрування, оскільки в результаті перетирання отримується напіврідкий продукт, що зумовлює необхідність зневоднення розчину, підвищення кількості сухих речовин. Специфічні реологічні властивості розчину при його концентруванні створюють ряд проблем. По перше, при підвищенні концентрації інтенсивність теплопередачі знижується із-за формуванні на поверхні приграничного шару. По друге, із підвищенням товщини шару зростає градієнт температур. З'являється присмак пригару, продукт псується. Тому на виробництвах обмежуються кінцевою концентрацією томат-пасты до 25–30°brix. Використання МХ дегідраторів дозволить отримати готовий продукт, кінцева концентрація якого значно вища на відміну від традиційних технологій. Це значно підвищить термін зберігання концентрату без завдання шкоди якості. Результати експериментальних досліджень процесу зневоднення томатної пасты у МХ дегідраторі представлені на рисунку 5.

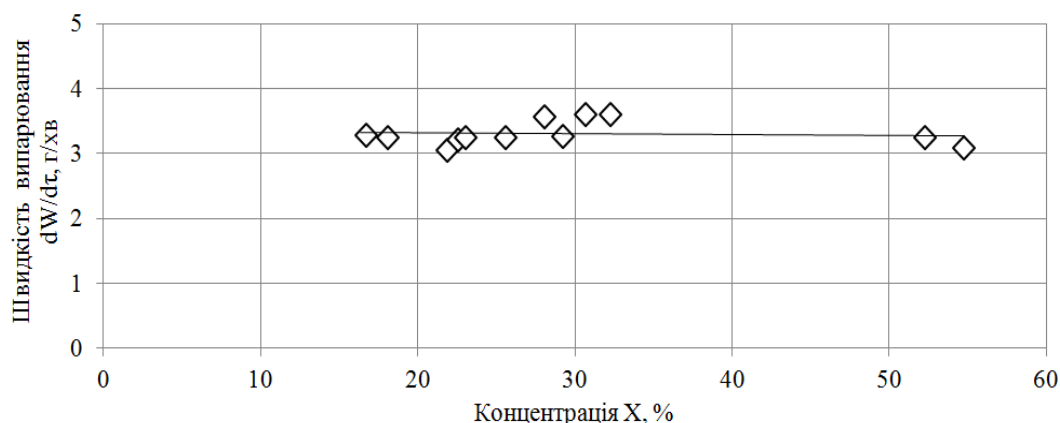


Рис. 5 – Процес зневоднення томатної пасты у дегідраторі

Результати експериментів свідчать, що інтенсивність процесу пароутворення при підвищенні концентрації майже у 4 рази залишається сталою, паропроодуктивність не залежить від концентрації томатної пасты (рис. 5). Так підтверджено гіпотезу, що технології об'ємного підведення енергії мають великі перспективи у харчових та фармацевтичних виробництвах. Але, для проектування МХ дегідраторів необхідно мати методику їх проектування.

Методика розрахунку та оптимізації МХ дегідратора.

Узагальнений алгоритм має включати розрахунки паропроодуктивності, фізичних властивостей розчину, числа енергетичної дії, числа магнетронів (рис. 6). Початковими даними для розрахунку виступають: об'єм вхідного продукту для концентрування, V_C ; значення початкової (X_H) та кінцевої (X_K) концентрацій; час процесу, τ ; електрична потужність одного джерела енергії, модуля, (N_i). Об'єм вологи в сировині, яку слід видалити, (V_B), тому об'єм вторинної пари визначається з матеріального балансу установки:

$$\left. \begin{aligned} V_K + V_B &= V_C \\ V_K X_K &= V_H X_H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рис. 6 – Алгоритм розрахунку МХ дегідратора

з (1) при $V_C = V_H$ визначається об'єм вторинної пари:

$$V_B = V_C - V_H \frac{X_H}{X_K} \quad (2)$$

Значення поточної концентрації розчину:

$$X = \frac{V_H \cdot X_H}{V_H - V_B} \quad (3)$$

Приклад використання схеми (рис. 6) наведено на рис. 7.

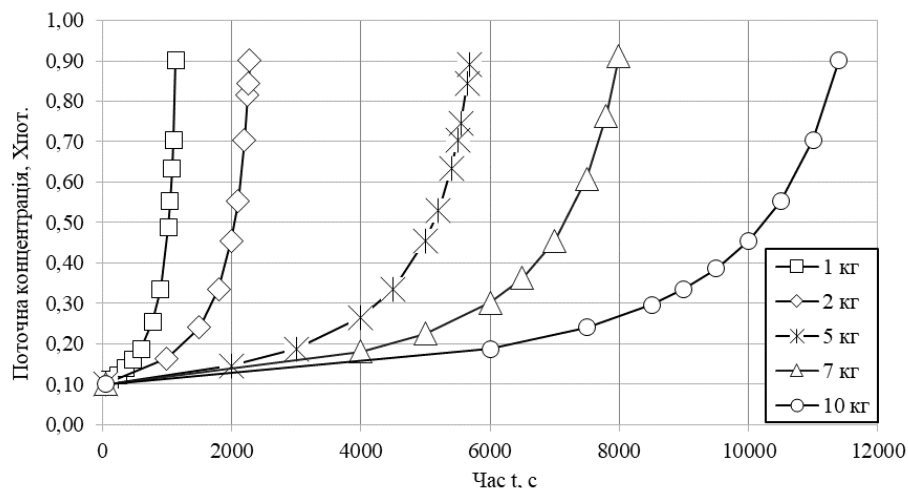


Рис. 7 – Зміна концентрації в часі в залежності від початкового об'єму

Розрахунок мікрохвильового дегідратору не потребує громіздких методів ітераційного проектування і може бути використаний як для проектування таких апаратів, та і для їх оптимізації.

Висновки. Проблеми традиційних технологій концентрування шляхом випаровування вирішуються при переході від принципів теплопередачі до систем об'ємного підведення енергії. Інструментом такого принципу є електромагнітні джерела енергії мікрохвильового діапазону. В роботі наведено приклади роботи дегідраторів із сталою паропроодуктивністю в діапазоні концентрацій до 90°brix. Запропонована методика розрахунку та оптимізації електродинамічних апаратів.

References

- Burdo O.G. (2021). Innovation of Energy Technologies of Food Industry in the Context of Global Problems of Humanity. *Scientific Works*, 85(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2082>
- Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. (2016). The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 6, Is. 3, P. 144–150.
- Burdo O.G., Trishyn F.A., Yarovy I.I. (2020). *Enerhetychni monitorynh kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv.* – Odesa: «Madzhenta», – 246s.
- Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-production Technologies (2005). *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 78, Is. 1, P. 90–96.
- Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210–218.
- Burdo O.G., Gavrilov A.V., Kashkano M.V., Levtrinskaya Y.O., Syrotyuk I.V., Pylypenko E.A., Terziev S.G. (2019). Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele energeticii regionale*, 2(43), 23–38. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
- Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. (2020). System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
- Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrilov A., Vsevolodov O., Sirotyuk I., Terziev S. (2020). Experimental Studies of the Kinetics of Infrared Drying of Spent Coffee Grounds. *Technology Audit and Production Reserves*. 1(51), 4–10. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195863>
- Burdo O.G., Alkhuri Yu., Pur D.R., Levtrynska Yu.O. (2018). Zastosuvannya elektromahnitnykh dzherel enerhii v innovatsiinykh tekhnolohiiakh pererobky kharchovoi syrovyny. *Scientific Works*, 81(2).
- Burdo O., Riznychenko T., Ruzhytska N. (2018). Modeliuvannya protsesu kontsentruiuvannya tsukrovnykh rozchyniv v mikrohvylovomu vakuum-vyparnomu aparati. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 17(1).
- Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. (2017). Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 11–88.

12. Wang R., Zhao D.H., Gao Yp., Xu Q., Wu L., Li Z. (2021). Power Control in Microwave Drying of Green Turnip. *Drying Technology*, 40(10), 2153–2163. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1927073>
13. Lei Yd., Chen Jl., Zhang Zh., Deng Xr. (2022). Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.37020>
14. Dincer C. (2021). Effect of Intermittent Microwave Vacuum Concentration on Quality Parameters of Apple Juice and Sour Cherry Nectar and Mathematical Modeling of Concentration. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 55(3). <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837>
15. Nejad S.L., Shahedi M., Fathi M. (2021). Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23(2), 307–317.
16. Bozkir H., Tekgul Y. (2022). Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*, 46(6), e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
17. Tao Y., Yan Bw., Zhang N.N., Wang M.F., Zhao Jx., Zhang H., Chen W., Fan Dm. (2021). Microwave Vacuum Evaporation as a Potential Technology to Concentrate Sugar Solutions: a Study Based on Dielectric Spectroscopy. *Journal of food engineering*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
18. Chua Ls., Leong C.Y. (2020). Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*, 44(10), e14786. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14786>
19. Khan M., Ghauri Ym., Alvi, T., Amin, U., Khan M.I., Nazir A., Saeed F., Aadil R.M., Nadeem M.T., Babu I. (2022). Microwave Assisted Drying and Extraction Technique, Kinetic Modeling, Energy Consumption and Influence on Antioxidant Compounds of Fenugreek Leaves. *Food science and technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.56020>
20. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua/>

INNOVATIVE ELECTRODYNAMIC DEHYDRATORS FOR CONCENTRATION OF SOLUTIONS

**Syrotiuk I.V., PhD, associate professor, Slavinska V.O., engineer, Petrovskiy V.V., graduate student
Odesa national university of technology, Odesa, Ukraine**

Abstract. The modern development of technologies for dehydration of food raw materials is aimed at solving one of the main contradictions in the production of food concentrates, namely improving the quality of the product while reducing the energy consumption of the process itself. An analysis of traditional equipment for dehydration of food solutions was carried out. The shortcomings of modern evaporation technologies are identified, among which the lack of the possibility of obtaining high concentrations without harming the nutritional value of the finished product and the long-term thermal load on the raw materials deserve special attention. The prospects of targeted energy delivery technologies for dehydration of liquid food systems, which would allow solving these problems, are substantiated. Electromagnetic sources of energy in the microwave range are defined as a tool for the implementation of such technologies. The scheme of the experimental stand and the results of the study of the effect of field power, concentration and type of raw materials on the intensity of steam productivity are given. The requirements for the main components of the dehydrator are determined. Approbation of the dehydrator module during the concentration of tomato paste was carried out. As a result, it was established that the steam productivity of the module is constant throughout the dehydration process. The efficiency of the module has been proven, it is possible to increase the concentration of the finished product several times while maintaining its quality. The method of calculation and optimization of microwave dehydrators is proposed. An example of calculating the kinetics of concentration of aqueous solutions in a microwave field is given. The obtained results indicate the prospects of the above-mentioned dehydration technologies and the presence of significant raw material and energy reserves.

Key words: concentration, address energy delivery technologies, microwave systems, dehydrator calculation methods.

Список використаної літератури

1. Burdo O.G. Innovation of Energy Technologies of Food Industry in the Context of Global Problems of Humanity. *Scientific Works*, 2021, 85(1), 91–99. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2082>
2. Burdo O.G., Zykov A.V., Terziev S.G., Ruzhitskaya N.V. The Nanotechnological Innovation in Food Industry. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2016, Vol. 6, Is. 3, P. 144–150.
3. Бурдо О.Г., Трішин Ф.А., Яровий І.І. *Енергетичний моніторинг харчових і переробних виробництв*. – Одеса: «Маджента», 2020. – 246с.
4. Burdo O.G. Nanoscale Effects in Food-production Technologies. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, Vol. 78, Is. 1, P. 90–96.

5. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2018, 54(2), 210–218.
6. Burdo O.G., Gavrilov A.V., Kashkano M.V., Levtrinskaya Y.O., Syrotyuk I.V., Pylypenko E.A., Terziev S.G. Energy Monitoring of Innovative Energy Technologies of Plant Raw Material Processing. *Problemele energeticii regionale*, 2019, 2(43), 23–38. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3367058>
7. Burdo O.G., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V., Shcherbich M.V. System of Innovative Energy Technologies of Food Raw Material Dehydration. *Problemele Energeticii Regionale*, 2020, 2(46), 92–107. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898317>
8. Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Gavrilov A., Vsevolodov O., Sirotyuk I., Terziev S. Experimental Studies of the Kinetics of Infrared Drying of Spent Coffee Grounds. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, 1(51), 4–10. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.195863>
9. Бурдо О.Г., Альхурі Ю., Пур Д.Р., Левтринська Ю.О. Застосування електромагнітних джерел енергії в інноваційних технологіях переробки харчової сировини. *Наукові праці ОНАХТ*, 2018, 81(2).
10. Бурдо О., Різниченко Т., Ружицька Н. Моделювання процесу концентрування цукрових розчинів в мікрохвильовому вакуум-випарному апараті. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2018, 17(1).
11. Burdo O., Bandura V., Zykov A., Zozulyak I., Levtrinskaya J., Marenchenko E. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, 4, 11–88.
12. Wang R., Zhao D.H., Gao Yp., Xu Q., Wu L., Li Z. Power Control in Microwave Drying of Green Turnip. *Drying Technology*, 2021, 40(10), 2153–2163. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1927073>
13. Lei Yd., Chen Jl., Zhang Zh., Deng Xr. Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes. *Food science and technology*, 2022, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.37020>
14. Dincer C. Effect of Intermittent Microwave Vacuum Concentration on Quality Parameters of Apple Juice and Sour Cherry Nectar and Mathematical Modeling of Concentration. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2021, 55(3). <https://doi.org/10.1080/08327823.2021.1952837>
15. Nejad S.L., Shahedi M., Fathi M. Comparative Study of Microwave-Assisted Vacuum Evaporation, Microwave-Assisted Evaporation, and Conventional Evaporation Methods on Physicochemical Properties of Barberry Juice. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(2), 307–317.
16. Bozkir H., Tekgul Y. Production of orange juice concentrate using conventional and microwave vacuum evaporation: thermal degradation kinetics of bioactive compounds and color values. *Journal of food processing and preservation*, 2022, 46(6), e15902. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15902>
17. Tao Y., Yan Bw., Zhang N.N., Wang M.F., Zhao Jx., Zhang H., Chen W., Fan Dm. Microwave Vacuum Evaporation as a Potential Technology to Concentrate Sugar Solutions: a Study Based on Dielectric Spectroscopy. *Journal of food engineering*, 2021, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110414>
18. Chua Ls., Leong C.Y. Effects of microwave heating on quality attributes of pineapple juice. *Journal of food processing and preservation*, 2020, 44(10), e14786. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14786>
19. Khan M., Ghauri Ym., Alvi, T., Amin, U., Khan M.I., Nazir A., Saeed F., Aadil R.M., Nadeem M.T., Babu I. Microwave Assisted Drying and Extraction Technique, Kinetic Modeling, Energy Consumption and Influence on Antioxidant Compounds of Fenugreek Leaves. *Food science and technology*, 2022, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.56020>
20. Електронний ресурс: <http://nanofood.com.ua/>

Отримано в редакцію 29.06.2023

Прийнято до друку 28.11.2023

Received 29.06.2023

Approved 28.11.2023