

УДК 621.3:66.048

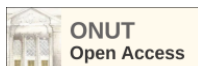
DOI: 10.15673/swonaft.v88i2.3047

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ФРАКЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ ПРИ ВИПАРЮВАННІ ХАРЧОВИХ РОЗЧИНІВ

Євтушенко І.М., аспірант, Сиротюк І.В. PhD, доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Copyright © 2024 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under Vthe Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Анотація. Процеси зневоднення харчових розчинів є одними із основних на харчових виробництвах. Однак, незважаючи на широке застосування таких методів вологовидалення існує ряд серйозних проблем пов'язаних з якістю готової продукції. Відомо, що в традиційних вакуум-випарних апаратах абсолютно неможливо отримати високі значення концентрації сухих речовин. Пов'язано це з характером поверхневого підведення енергії, який зумовлює пригорання продукту на стінках апарату через значне підвищення його в'язкості. Проведено аналіз наукової літератури, присвяченої вирішенню цих проблем. Виявлено, що в більшості з них пропонується використовувати альтернативні джерела енергії, що зумовлюють зміни в організації процесу випарювання. Зазначено, що найбільш перспективним напрямком є мікрохвильові технології, які дозволяють організувати підведення енергії не до поверхні сировини, а до всього об'єму одночасно. Це дозволяє отримати високі значення кінцевих концентрацій без завдання шкоди якості. Проте виникає ще одна проблема, пов'язана із втратою цінних та корисних летких компонентів із вторинною парою. Зазвичай на підприємствах для відділення цих компонентів від загального об'єму конденсату застосовують метод дистиляції. Такий підхід потребує спеціального обладнання та додаткових енергетичних витрат. В роботі пропонується розділяти полікомпонентну парову фазу одразу після процесу її утворення при випарюванні. Представлена конструкція експериментального стенду фракційної мікрохвильової вакуум-випарної установки. Ключовим елементом в ній виступає конденсаторна система, головна ідея якої полягає у розділенні вторинної пари на легколеткі та важколеткі компоненти, що відрізняються температурами конденсації. Для точності проведення експериментальних досліджень передбачений автоматизований збір та обробка даних, що надходять з датчиків температур та ваг. Проведені дослід з розділення водо-спиртового розчину з метою перевірки працездатності та герметичності установки, які підтверджують її доцільність та актуальність.

Ключові слова: випарювання, фракційне розділення, мікрохвильове поле, аналітичне та експериментальне моделювання.

Вступ

Розвиток світового ринку харчових концентратів й досі має досить позитивну динаміку незважаючи на певний ряд негативних факторів, зумовлених енергетичною, ресурсною та, як наслідок, фінансовою кризами, війсьними конфліктами в країнах, які роблять вагомий внесок у цей розвиток. Широкий попит на дану продукцію у всіх сферах діяльності суспільства обумовлений легкістю приготування, великими термінами зберігання та, що не менш важливо, компактністю. Однак виробництво концентратів зіштовхується із серйозними проблемами відносно ресурсо- та енергоефективності процесів. На фоні різкого подорожчання передачі електроенергії для підприємств у 2025 році майже на 30% у порівнянні із теперішнім роком суттєво знижується конкурентоспроможність готової продукції, оскільки за прогнозом Федерації роботодавців України витрати на енергію підвищаться на 13 млрд. грн. [1]. В зв'язку із цим актуальність пошуку енергоефективних технологій переробки рослинної сировини стає все дедалі більшою. Особливо це стосується полікомпонентної сировини, кінцева продукція з якої отримується шляхом організації декількох послідовних процесів. В умовах енергодефіциту собівартість таких продуктів буде стрімко зростати, що потребує раціональних підходів до вирішення цієї проблеми.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми

Водночас із найбільшою розповсюдженістю процеси зневоднення є і найбільш енерговитратними. Це викликає неабиякий інтерес у науковців, діяльність яких спрямована на пошук можливостей поліпшити

протікання цих процесів разом із збереженням якості готової продукції. Неабияка зацікавленість проявляється по відношенню до проблематики процесів випарювання харчових розчинів. Енергоефективність таких процесів, як правило, досить висока і може сягати 80%. Однак в даному випадку гостро стоїть питання з ресурсоефективністю. Високі значення температур обробки, суттєве підвищення в'язкості продукту в процесі випарювання, зростання приграничного шару на стінках вакуум-випарного апарату (ВВА) зумовлюють відсутність можливості отримання високих значень кінцевих концентрацій сухих речовин без псування сировини. Відповідно до цього наукова спільнота вдається до пошуку нових методів організації цих процесів, що дали б змогу вирішити ці проблеми. Результати їх роботи добре відображені у наукових працях, опублікованих в авторитетних джерелах.

У 2023 році спільними зусиллями науковців Аграрного університету (Пакистан), Університетів Цзянсу, Фошань та Південно-китайського технологічного університету (Китай) було проведено дослідження процесу випарювання виноградного соку в умовах дії мікрохвильового поля та вакууму [2]. Значення режимних параметрів варіювались в наступних діапазонах: потужність МХ поля – 30-80 Вт, тиск – 35-70 кПа, тривалість процесу – 5-15 хвилин. Кінцева концентрація готового продукту становила приблизно 78%Brix.

У 2024 році у Близькосхідному технічному університеті (Туреччина) досліджувався процес зневоднення сахарози з використанням мікрохвильового вакуум-випарного апарату [3]. Концентрація початкового цукрово-спиртового розчину становила 70%Brix, тому основним завданням була кристалізація сахарози. В результаті було зазначено, що мікрохвильові технології дозволяють суттєво прискорити кристалізацію у порівнянні з традиційними технологіями.

У 2022 році вченими Технологічного університету Малайзії були проведені експерименти з випарювання ананасового соку в ротаційному вакуум-випарному апараті [4]. Температура процесу коливалась в межах 60-70°C, тривалість випарювання варіювалась від 30 до 60 хвилин. Незважаючи на малий вихід вторинної пари, автори відмітили, що даний метод та умови процесу випарювання досить сприятливі за рахунок низького вмісту гідроксиметилфурфуролу (концерген) та збереження активності бромелайну (фермент, що сприяє покращенню травлення та обміну речовин) до 30%.

У цьому ж році на базі Університету Мунзур (Туреччина) було вивчено процес зневоднення у вакуум-випарній установці з омичним нагрівом [5]. В якості об'єкту досліджень був обраний апельсиновий сік концентрацією 11,4%. Кінцева концентрація сухих речовин становила 42%. Температури процесу становили 100°C, 85°C, 75°C та 65°C при значеннях абсолютного тиску 101,32 кПа, 58 кПа, 39 кПа та 25 кПа і тривалості випарювання 34, 40, 48 та 54 хвилини відповідно.

На основі вищерозглянутих джерел можна дійти висновку, що пошук нових принципів зневоднення харчових розчинів досі актуальний. Результати представлених досліджень вказують на перспективність обраних методів випарювання, проте не розкривають їх можливості у повній мірі.

В науково-дослідній лабораторії «Харчові нанотехнології» Одеського національного технологічного університету активно проводяться експериментальні дослідження щодо зневоднення харчових розчинів в умовах дії електромагнітного поля [6-10]. В результаті було доведено можливість отримання твердої фази при зневодненні рідин при відносно сприятливих для термолабільної сировини температурах обробки (40-50°C) та низькому тиску (до 10 кПа), що дозволяє зберегти якість та смакові властивості продукту. Окрім того, в лабораторії реалізована конструкція, що дозволяє організувати процес дегідратації розчинів у безперервному режимі. При цьому зберігається можливість забезпечення глибокого вакууму на протязі всього процесу без постійної роботи вакуум-насосу [9].

Однак, незважаючи на такі серйозні досягнення, невирішеною залишається ще одна не менш важлива проблема. Вторинна пара, що утворюється в процесі випарювання і в подальшому конденсується, є полікомпонентною і цінність цих компонентів достатньо висока. Проте їх розділення потребує окремого спеціального обладнання та додаткових енергетичних витрат. Це в свою чергу призводить до підвищення собівартості кінцевого продукту і суттєво звужує коло потенційних споживачів.

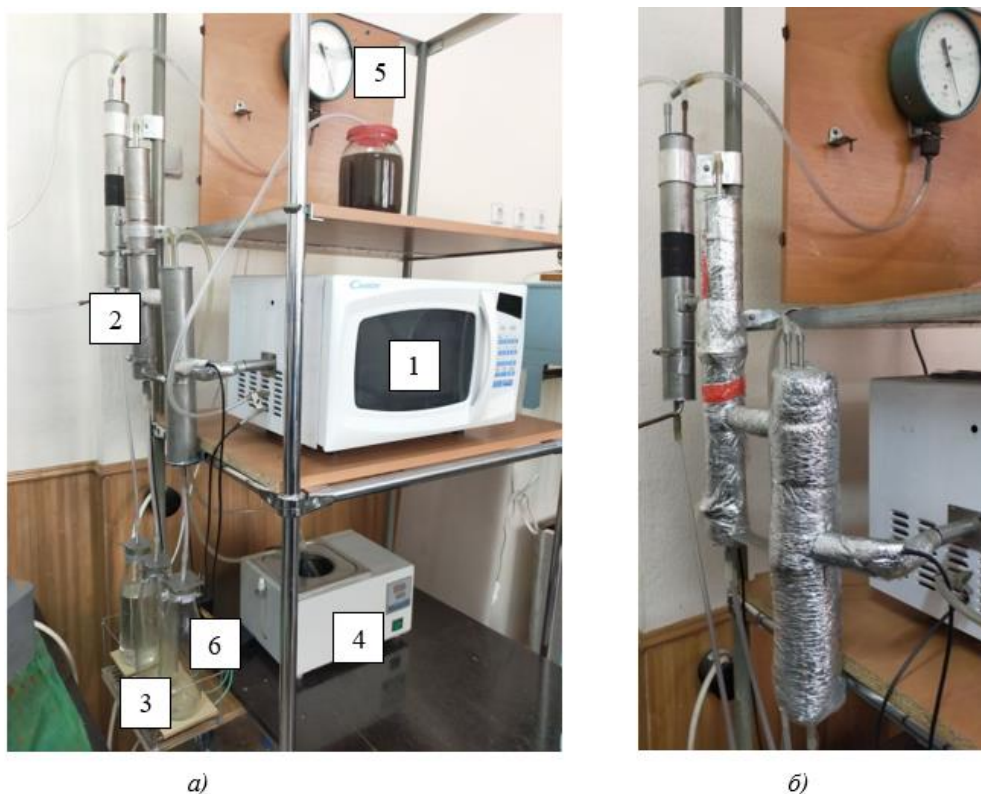
В зв'язку із цим пропонується реалізувати процес розділення вторинної пари одразу після її утворення в процесі концентрування розчинів.

Конструкція фракційної мікрохвильової вакуум-випарної установки

Фракційна мікрохвильова вакуум-випарна установка (рис. 1а) складається з наступних основних елементів: мікрохвильова камера (1), конденсаційна система (2), ваговий комплекс зі збірниками конденсатів (3), водонагрівальна установка (4), водоохолоджувальна установка, вакуумметр (5), вакуум-насос, вимірювально-обчислювальний комплекс (6). Установка оснащена автоматизованим збором та обробкою інформації з датчиків температур, що встановлені перед кожним конденсатором та в камері з продуктом, та з тензоваг, що відображають маси конденсатів.

Основна ідея розділення полікомпонентної вторинної пари полягає у використанні різних температур конденсації. Була запропонована конструкція конденсаційної системи, що складається з декількох

послідовно під'єднаних конденсаторів (рис. 1б). В кожному конденсаторі забезпечується відповідна температура конденсації, в залежності від типу компоненту, що планується відділити на певному етапі.



а) загальний вигляд стенду; б) конденсаційна система

Рис. 1 – Експериментальний стенд фракційної МХ ВВУ.

В рамках автоматизованого збору та обробки інформації була реалізована SCADA-система (рис. 2), яка дає змогу в реальному часі спостерігати за характером протікання процесу. Експериментальні дані, отримані за допомогою вимірювально-обчислювального комплексу, в результаті обробки надходять до SCADA-системи та інтерпретуються у вигляді графічних залежностей та гістограм. В програмі передбачена звукова та візуальна сигналізація при перевищенні критичних значень температур та мас.

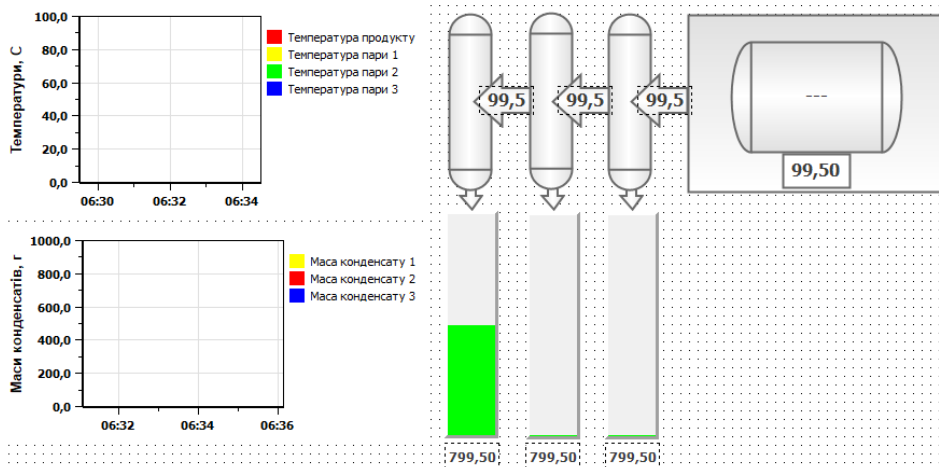


Рис. 2 – Вікно редактору SCADA-системи.

З метою перевірки працездатності установки, її герметичності та підтвердження гіпотези в цілому були проведені експериментальні дослідження з розділення водо-спиртового розчину. В результаті були отримані наступні графічні залежності (рис. 3, 4).

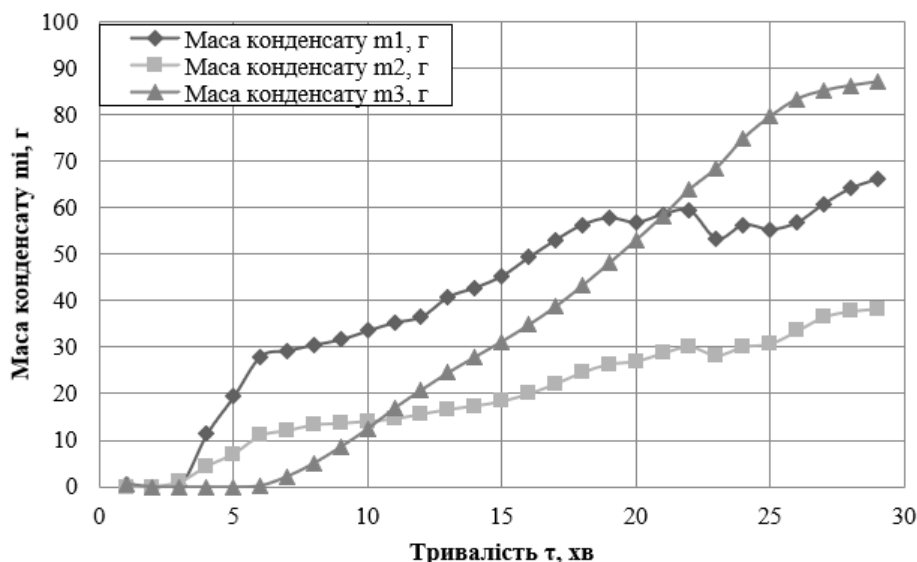


Рис. 3 – Зміна мас конденсатів в часі.

На графіку (рис. 3) видно, що легколеткий компонент першим починає конденсуватись із загального об'єму вторинної пари. Важколеткий, в свою чергу, минаючи першу зону, конденсується частково в другій та в третій.

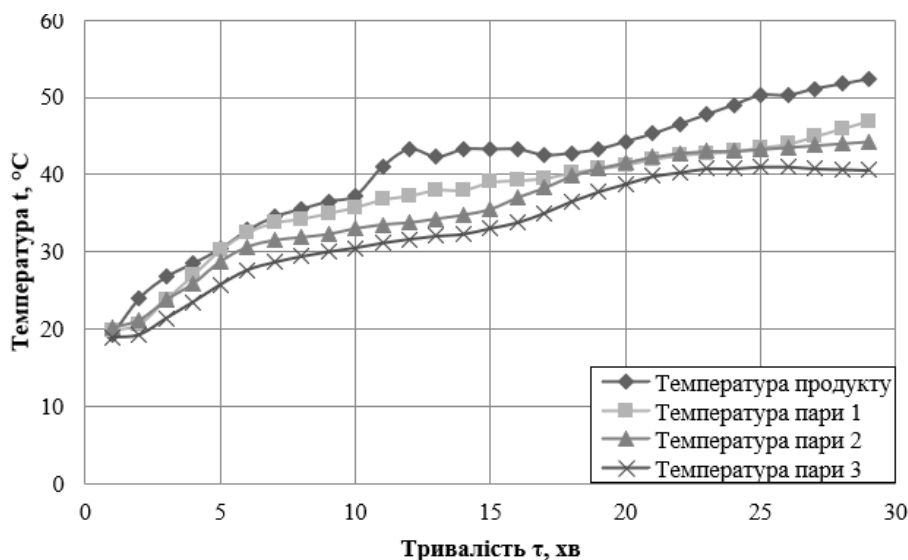


Рис. 4 – Зміна температур продукту та вторинної пари перед кожним конденсатором в часі.

Згідно отриманих термограм (рис. 4) можна стверджувати, що температури конденсації дійсно відрізняються і доцільність такого методу розділення вторинної пари є очевидною.

Висновки

При проведенні літературного аналізу були виявлені недоліки представлених методів зневоднення харчових рідин, які були враховані при конструюванні інноваційного мікрохвильового вакуум-випарного апарату з фракційним розділенням вторинної пари. Каскад конденсаторів з різними значеннями температур конденсації дозволить розділяти вторинну пару на легколеткі та важколеткі компоненти паралельно з процесом концентрування розчинів. Автоматизація збору та обробки даних дозволяє уникнути людського фактору та отримати достовірні дані експериментальних досліджень. Ця технічна комбінація дозволить суттєво скоротити час на декомпозицію початкового розчину, а також зменшити енерговитрати при розділенні.

Література

1. Електронний ресурс: <https://gmcenter.ua/posts/cini-na-elektroenergiyu-v-ievropi-u-grudni-zrostali-na-bilshosti-rinkiv/> (Дата звернення 20.11.2024 р.).
2. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Mahmood Khan I., Niazi S., Waheed Iqbal M., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation Kinetics and Quality Attributes of Grape Juice Concentrate as Affected by Microwave and Vacuum Processing. *International Journal of Food Properties*, 2023, 26(1), 1596–1611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>
3. Ibis O.I., Bugday Y.B., Aljurf B.N., Goksu A.O., Solmaz H., Oztop M.H., Sumnu G. Crystallization of Sucrose by Using Microwave Vacuum Evaporation. *Journal of Food Engineering*, 2024, 365, 111847. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111847>
4. Chua L.S., Leong C.Y. Optimization, Kinetic Studies, and Upscaling of Vacuum Evaporation for Pineapple Concentrates. *ACS Food Science & Technology*, 2022, 2(2), 331–336. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00425>
5. Sabanci S., Icier F. Evaluation of an Ohmic Assisted Vacuum Evaporation Process for Orange Juice Pulp. *Food and Bioprocess Processing*, 2022, 131, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.009>
6. Burdo O., Levitsky A., Trishyn F., Terziev S., Sirotiuk I., Burdo A., Lapinska A., Molchanov M. Electrodynamics Technologies in the Eco-industry of Food and Pharmaceutical Production. *Problemele Energeticii Regionale*, 2023, 58(2), 122–137. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>
7. Burdo O.G., Gavrilov A.V., Sirotiuk I.V., Ruzhitskaya N.V., Goncharov D.S. Electrodynamics Apparatuses for Solutions' Concentration. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2022, 58(3), 290–298. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030073>
8. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotiuk I.V. Electrodynamics Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2021, 57, 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
9. Сиротюк І.В. Дослідження мікрохвильового вакуум-випарного модуля безперервної дії. *Scientific Works*, 2021, 85(1), 104–109. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2077>
10. Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotiuk I.V., Pour D.R. Technologies of Selective Energy Supply at Evaporation of Food Solutes. *Regional Energetic Problems*, 2017, 33(1), 100–109. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1193622>

INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF FRACTIONAL SEPARATION DURING FOOD SOLUTIONS EVAPORATION

**Yevtushenko I.M., graduate student, Syrotiuk I.V., PhD, associate professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine**

Abstract. Dehydration processes of food solutions are one of the main ones in food production. However, despite the widespread use of such moisture removal methods, there are a number of serious problems related to the quality of finished products. It is known that in traditional vacuum evaporators it is absolutely impossible to obtain high values of dry matter concentration. This is due to the nature of the surface energy supply, which causes the product to burn on the walls of the apparatus due to a significant increase in its viscosity. An analysis of the scientific literature devoted to solving these problems was conducted. It was found that most of them propose to use alternative energy sources that cause changes in the organization of the evaporation process. It is noted that the most promising direction is microwave technologies, which allow organizing the supply of energy not to the surface of the raw material, but to the entire volume simultaneously. This allows obtaining high values of final concentrations without compromising quality. However, another problem arises, related to the loss of valuable and useful volatile components with secondary steam. Typically, enterprises use the distillation method to separate these components from the total volume of condensate. This approach requires special equipment and additional energy costs. The paper proposes to separate the multicomponent vapor phase immediately after its formation during evaporation. The design of an experimental stand of a fractional microwave vacuum evaporation plant is presented. The key element in it is a condenser system, the main idea of which is to separate the secondary vapor into volatile and non-volatile components that differ in condensation temperatures. For the accuracy of experimental studies, automated collection and processing of data coming from temperature sensors and scales is provided. Experiments on the separation of a water-alcohol solution were conducted to check the operability and tightness of the plant, which confirm its feasibility and relevance.

Key words: evaporation, fractional separation, microwave field, analytical and experimental modeling.

References

1. Електронний ресурс: <https://gmcenter.ua/posts/cini-na-elektroenergiyu-v-ievropi-u-grudni-zrostali-na-bilshosti-rinkiv/> (Дата звернення 20.11.2024 р.).
2. Hameed A., Maan A.A., Khan M.K.I., Mahmood Khan I., Niazi S., Waheed Iqbal M., Riaz T., Manzoor M.F., Abdalla M. Evaporation Kinetics and Quality Attributes of Grape Juice Concentrate as Affected by Microwave and Vacuum Processing. *International Journal of Food Properties*, 2023, 26(1), 1596–1611. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2218062>
3. Ibis O.I., Bugday Y.B., Aljurf B.N., Goksu A.O., Solmaz H., Oztop M.H., Sumnu G. Crystallization of Sucrose by Using Microwave Vacuum Evaporation. *Journal of Food Engineering*, 2024, 365, 111847. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111847>
4. Chua L.S., Leong C.Y. Optimization, Kinetic Studies, and Upscaling of Vacuum Evaporation for Pineapple Concentrates. *ACS Food Science & Technology*, 2022, 2(2), 331–336. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00425>
5. Sabanci S., Icier F. Evaluation of an Ohmic Assisted Vacuum Evaporation Process for Orange Juice Pulp. *Food and Bioprocess Processing*, 2022, 131, 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.09.009>
6. Burdo O., Levitsky A., Trishyn F., Terziev S., Sirotuk I., Burdo A., Lapinska A., Molchanov M. Electrodynamical Technologies in the Eco-industry of Food and Pharmaceutical Production. *Problemele Energeticii Regionale*, 2023, 58(2), 122–137. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>
7. Burdo O.G., Gavrilov A.V., Sirotuk I.V., Ruzhitskaya N.V., Goncharov D.S. Electrodynamical Apparatuses for Solutions' Concentration. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2022, 58(3), 290–298. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030073>
8. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotuk I.V. Electrodynamical Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2021, 57, 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
9. Сиротюк І.В. Дослідження мікрохвильового вакуум-випарного модуля безперервної дії. *Scientific Works*, 2021, 85(1), 104–109. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2077>
10. Burdo O.G., Burdo A.K., Sirotuk I.V., Pour D.R. Technologies of Selective Energy Supply at Evaporation of Food Solutes. *Regional Energetic Problems*, 2017, 33(1), 100–109. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1193622>

Отримано в редакцію 25.11.2024

Прийнято до друку 11.12.2024

Received 25.11.2024

Approved 11.12.2024