УДК 66.047.3.086.2:621.577:536.7
DOI https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2957

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА МІКРОХВИЛЬОВОГО ДЕГІДРАТОРА ІЗ ТЕПЛОНАСОСНИМИ ВИПАРНИМИ АПАРАТАМИ

Бурдо О. Г., д.т.н., професор, Славинська В.О., інженер
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. *Проведено аналіз розроблених авторами електромагнітних дегідраторів, визначено резерв по зменшенню витрат енергії, за умов утилізації енергії пари шляхом її термотрансформації. Виявлені суттєві недоліки випарних апаратів та методики вирішення існуючих проблем та протиріч. Запропоновано об'єднання впливу на систему мікрохвильового поля та теплового насоса. Розглядаються інноваційні методи зневоднення завдяки використанню теплових насосів у харчовій промисловості. Сформовано принципову схему енергоефективного двоступеневого електродинамічного дегідратора з тепловим насосом. Виконано порівняння показників енергоефективності різних традиційних технологій зневоднення та запропонованого інноваційного аппарату. Наведено методику розрахунку енергетичної ефективності систем із прямими та реверсними потоками енергії. Аналізуються схеми багатоступеневих дегідраторів із тепловими насосами. Наведено результати комп'ютерного експерименту із двоступеневим та чотирьохступеневим дегідратором. Показано, як зростає загальний ККД за рахунок формування реверсних потоків. Розглядаються питання оптимізації систем із реверсними потоками. Наведено, що використання на останній ступені електродинамічного апарата дозволяє отримати висококонцентрований якісний розчин, а використання енергії вторинної пари на основі теплових насосів у рази підвищити енергетичну ефективність системи. Запропоновано інноваційну установку із комбінованими системами електродинамічного та тепло насосного типів. Визначено режими її експлуатації та оптимізації.*

Ключові слова: мікрохвильові електродинамічні дегідратори, теплові насоси, енергетична ефективність, реверсні потоки енергії.

Вступ. Випарні апарати завдяки простоті конструкції та експлуатації найбільш поширені в хімічних, харчових, фармацевтичних та інших галузях промисловості. Разом з тим, принцип поверхневого підведення енергії у випарних апаратах для деяких розчинів має суттєвий недолік. З підвищенням концентрації розчину зростає в'язкість, знижується інтенсивність циркуляції розчину, на поверхні зростає товщина примежового шару і його термічний опір, з'являється присмак варіння і пригару. На практиці ця проблема вирішується обмеженням величини кінцевої концентрації готового продукту. Останніми роками активно ведуться дослідження з використання принципів об'ємного підведення енергії та термотрансформації на базі теплових насосів. У цій роботі досліджується технічна ідея комбінації систем електродинамічного типу і теплових насосів для утилізаторів теплоти вторинної пари.

Аналіз проблеми та формулювання науково-технічної гіпотези. У роботі [1] розглядається вплив різних інноваційних методів зневоднення з використанням сушарки з тепловим насосом на ефективність процесу та якість сушених яблук, бананів, винограду, мармеладу, ківі та ананасів. Сушарки з тепловим насосом використовуються як один із корисних і багатообіцяючих методів зневоднення в харчовій промисловості завдяки їхньому низькому споживанню енергії та витратам, високій продуктивності, низькій температурі сушіння, і часу, а також меншій втраті якості сушених продуктів.

У дослідженні [2] чорний виноград GP Kalecik karası з насінням сушили в сушарці з тепловим насосом замкненого циклу, призначеній для продуктів з високим вмістом вологи. Визначено вплив температури сушильного повітря на біоактивні властивості та характеристики сушіння побічних продуктів виноробства, а також продуктивність системи. У дослідженні [3] проводиться теоретичний аналіз та експериментальне дослідження низькотемпературної системи сушіння за допомогою теплового насоса.

На основі теоретичних моделей проведено аналіз чутливості температури випаровування, температури конденсації та масової витрати повітря до температури та вологості повітря на виході з сушильної шафи, швидкості сушіння та питомої витрати електроенергії. У роботі [4] було вивчено сушильну установку з тепловим насосом з погляду продуктивності системи та енергоефективності під час сушіння баклажанів (Solanum melongena L.) за постійної температури повітря та різних систем роботи. У дослідженні [5] розроблено імітаційну гідродинамічну модель на основі експериментального дослідження сушіння листя амаранту в оптимізованій сушильній установці з тепловим насосом. Досліджено вплив різних умов на тепло- та масообмін.

У дослідженні [6] було розроблено гібридну систему сушіння, що поєднує в собі всі переваги різних методів сушіння. Метою даного дослідження було порівняння експериментальних результатів сушильної установки з тепловим насосом і сушильної установки з тепловим насосом з інфрачервоним випромінюванням, визначення енергетичної та ексергетичної ефективності сушарок, а також аналіз кінетики сушіння тертої моркви. У роботі [7] було виготовлено та випробувано сушильну установку з тепловим насосом, оптимізо-

вану з різних конфігурацій з використанням програмного забезпечення обчислювальної гідродинаміки. Експериментальне дослідження проводили в оптимізованій конфігурації для діапазону температур від 50 до 60ºС, діапазону відносної вологості від 20 до 12% і швидкостей повітря 1,41 м/с, 2,39 м/с і 3,24 м/с.

Таким чином, теплові насоси широко й ефективно використовуються для задач зневоднення в сушарках. Досліджень щодо використання теплових насосів у комбінованих схемах випаровування та мікрохвильової дегідратації в доступних публікаціях не знайдено. Для розв'язання протиріч традиційних випарних апаратів, сформульованих у вступі, пропонується така науково-технічна гіпотеза: «використання на останньому ступені зневоднення електродинамічних систем об'ємного підведення енергії з подальшою утилізацією енергії вторинної пари теплонасосним циклом для зневоднення на перших ступенях дасть змогу при істотному скороченні витрат енергії одержувати додатково розчин гідролата».

Методи та результати досліджень. На основі сформульованої науково-технічної гіпотези розроблено принципову схему двоступеневого електродинамічного дегідратора з тепловим насосом. На останньому ступені за рахунок електричної енергії Ne формується потік електромагнітної енергії, який, взаємодіючи з полярними молекулами розчину, переводить їх у пару (рис. 1). У результаті концентрація розчину (Хк) підвищується і готовий продукт у кількості (М) відводиться з установки. Вторинна пара (W2) надходить у випарник (І) теплового насоса, конденсується і відводиться з установки у вигляді потоку гідролата (Gг). Енергія конденсації передається робочому тілу (Gx) теплового насоса і, за допомогою компресора (Км), трансформується на більш високий рівень температур. Це дає змогу в конденсаторі теплового насоса (Кд) здійснювати випарювання із сировини, витрата якої (Gc) а концентрація (Хс). Частково зневоднений розчин із концентрацією (Х1) у кількості (G1) подається в останній ступінь.

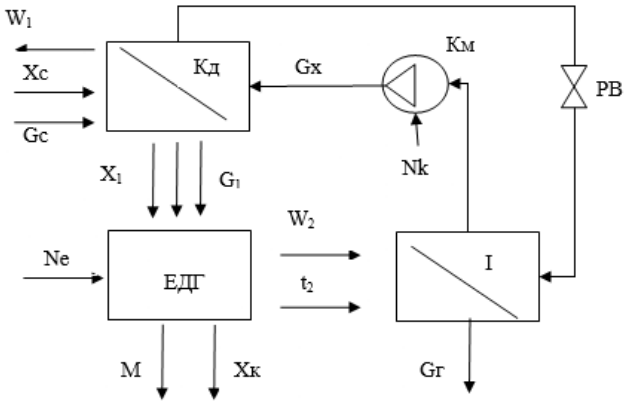

Рис. 1 – Принципова схема двоступеневого мікрохвильового дегідратора з тепловим насосом

Енергетичний ефект установки полягає в тому, що передбачена можливість утилізації теплоти вторинної пари, тобто організація «реверсного» потоку, що підвищує енергетичний ККД.

У разі «реверсних» потоків енергії розраховуються ККД реверсних елементів.

$$\eta_{pi} = \frac{Q_{pi}}{E_T} \tag{1}$$

Підсумковий тепловий показник системи визначається:

$$\eta = \frac{E_{пр} + \sum_i Q_{Pi}}{E_T} = \prod_{n=1}^{n} \eta_i + \frac{\sum_i Q_{Pi}}{E_T} \tag{2}$$

На основі цієї гіпотези пропонується оперувати в розрахунках базовими характеристиками джерела енергії, наприклад палива з теплотою згоряння 40 МДж/кг. Тобто 1 кг нафтового еквівалента (кг н.е.) виділяє енергію в 40 МДж/кг н.е.

Для проведення аналізу розглянутих схем вводиться показник ефективності використання енергії палива:

$$d = \frac{Gn}{b} \tag{3}$$

де, *b* — 1 кг палива; *G* — кількість видаленої вологи, кг.

На основі цієї методології проведено аналіз двоступеневого електродинамічного дегідратора з реверсним потоком (табл. 1). Використовується енергія вторинної пари останнього ступеня, яка тепловим насосом

трансформується на вищий температурний рівень. Це дає змогу за рахунок тепла, що утилізується, здійснити випарювання в першому ступені. Коефіцієнт термотрансформації теплового насоса для розглянутих діапазонів температур прогнозується від 4 до 6.

Таблиця 1

Порівняння традиційних і запропонованого показників енергоефективності різних технологій зневоднення

Енерготехнологія	Витрата на 1 кг видаленої вологи		ККД		
	Енергії, J, МДж,	Палива, do, 1кг н.е.	Прямих потоків	Реверсних потоків	Загальний
Сушка традиційна	4- 10	0,1 – 0,25	0,4-0,1	0	0,2
Сушка в ЕМП	3	0,15 – 0,25	0,5-0,8	0	0,4
Випарка+сушка традиційна	3 - 6		0,3 – 0,4	0	0,3 – 0,4
Випарка традиційна	3		0,5	0	0,5
Двоступеневий дегідратор із тепловим насосом	1,5		0,4	0,2	0,6

За допомогою запропонованої методики проведено оцінку ефективності використання енергії в традиційних технологіях сушіння та випарювання і запропонованих в ОНТУ методів сушіння та випарювання в електромагнітному полі. Проведені оцінки свідчать про енергетичні та економічні переваги пропонованих апаратів. Природно, капітальні витрати на проектування і виготовлення таких апаратів виявляться вищими, ніж у традиційних конструкцій, що вимагає окремих розрахунків.

Розглянемо кінетику дегідратації у двоступеневій установці з тепловим насосом за таких вихідних даних. Тип розчину - водний, тиск - 30 кПа, початкова концентрація розчину X_1 — 0,1, кінцева концентрація продукту, X_F — 0,85, кількість готового продукту, M — 4 кг, електрична потужність другого ступеня, N_E — 2 кВт, температура продукту на вході, t_1 °С, температура випарювання, t_{Ev} °С, 2 ступінь працює за циклом теплового насоса (рис. 2). Час циклу прийнято 7220 с.

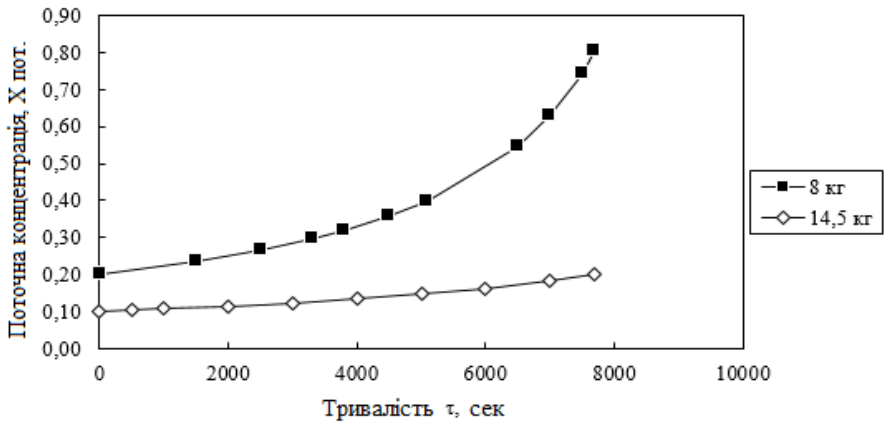

Рис. 2 – Кінетика зневоднення у двоступеневій установці

Видно, що в 1 ступені видалено 14,5 кг вологи, а концентрація підвищилася на 0,5%. У 2 ступені видалено 8 кг вологи, а концентрація підвищилася в 4 рази (з 0,2 до 0,8).

Зі збільшенням числа теплонасосних ступенів енергетична ефективність установки підвищуватиметься. Проведемо аналіз у чотириступеневій установці з тепловими насосами за таких вихідних даних (табл. 2).

Таблиця 2

Зведення вихідних даних для чотириступеневого дегідратора з тепловими насосами

N	Параметр	Розмірність	Значення
1	Тиск	кПа	30
2	Початкова концентрація розчину, Хн		0,1
3	Кінцева концентрація продукту, Хк		0,85
4	Кількість готового продукту, М	кг	4
5	Електрична потужність 4 ступені, Ne	кВт	2
6	Час циклу	с	7220

Обчислювальний експеримент проведено для водного розчину.

Методика розрахунку. Корисною вважається енергія, яка витрачається на утворення парової фази, кількість якої *W*. При цьому, $W_1=W_2=W_3=W_4=W$, таким чином, оптимізація виконується за параметром *W*. Кількість корисної енергії визначається за співвідношенням:

$$Q_V = W \cdot r \tag{4}$$

де r - теплота фазового переходу, Дж/кг. Температура випарювання у всіх ступенях однакова, t_{EV}, °С.

Методика розрахунку останнього четвертого ступеня.

Розглянемо матеріальний та енергетичний баланси реактора (рис. 3).

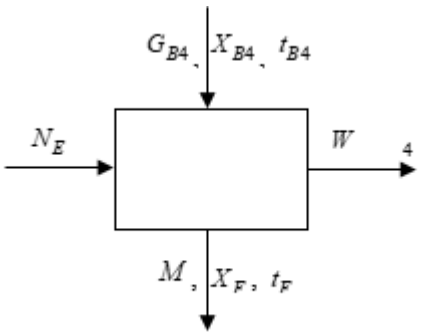

Рис. 3 – Постановка завдання

Параметри: *M*, X_F, N_E — є вихідними даними, температура визначається за тиском у реакторі залежно від типу розчину. Кількість випареної вологи розраховується за співвідношенням (4), що разом із G_{B4} є основним результатом розрахунку цього ступеня і вхідними параметрами для 3 ступеня.

Методика розрахунку третього ступеня.

Розглянемо матеріальний та енергетичний баланси 3 ступеня.

Відомими параметрами 3 ступеня є $G_{K3}=G_{B4}$ і $X_{K3}=X_{B4}$. Залишаються постійними параметри: *P*, *t*, *W*, τ.

Повний матеріальний баланс:

$$G_{I3} = G_{K3} + W \tag{5}$$

Матеріальний баланс за цільовим компонентом:

$$G_{B3} \cdot X_{B3} = G_{K3} \cdot X_{K3} \tag{6}$$

Енергетичний баланс:

$$N_k \cdot \Psi = W \cdot r \tag{7}$$

де ψ — коефіцієнт термотрансформації теплового насоса, який для температурних режимів задачі може змінюватися в межах 4—6, N_k— потужність компресора теплового насоса.

Параметри G_{B3} та X_{B3} є основним результатом розрахунку цього ступеня і вхідними параметрами для 2 ступеня. Фізичні схеми, розрахункові співвідношення для 2 і 1 ступенів аналогічні 3 ступеню за умови узгодження відповідних індексів. Особливістю розрахунку 1 ступеня є те, що необхідно визначити ту кількість вихідного розчину G_R, яке відповідає значенню концентрації вихідного розчину X_R (рис. 2) і встановленому часу циклу.

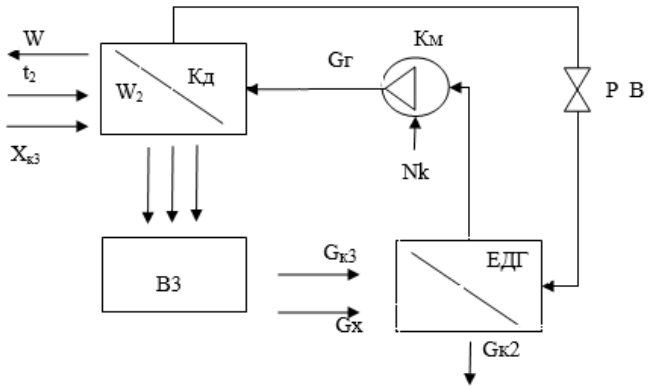

Рис. 4 – Схема 3 ступені

Оціночні розрахунки виконано для такого набору вихідних даних (табл. 3).

Таблиця 3

Зведення вихідних даних для розрахунку 4-х ступеневого електродинамічного теплонасосного дегідратора

N	Параметр	Значення	N	Параметр	Значення	N	Параметр	Значення
1	P, кПа	30	2	t, C	20	3	M.кг	4
4	Xc	0,1	5	Xк	85	6	Ne, кВт	2
7	W, кг	5	8	ψ	5	9		

Встановлено прийнятне для вихідних даних (табл. 1) значення часу циклу, τ = 7200 с. За такими вихідними даними проведено обчислювальний експеримент за спеціальною програмою. У результаті встановлено матеріальні баланси: у 1 ступінь необхідно подавати 32 кг розчину, у 2 - 20, у 3 - 14, у 4 - 9.

Кінетика зміни поточних концентрацій ($X_{пот}$ у чотирьох ступенях наведено на рис. 5.

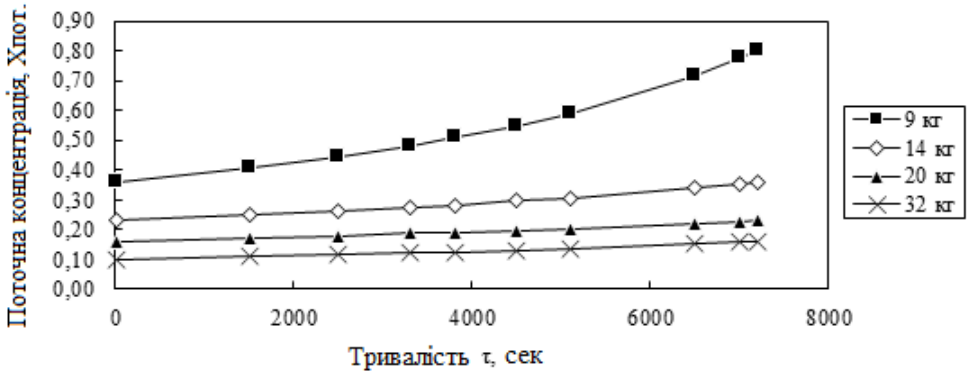

Рис. 5 – Кінетика процесів випаровування в 4- ступеневій установці

Розроблена програма дає змогу розраховувати будь-які комбінації електродинамічних і теплонасосних систем. Однак, питання економічної ефективності потребують врахування специфічних науково-технічних протиріч. З одного боку, ступінь підвищення потенціалу парового потоку не настільки істотний і не є проблемою для теплових насосів. З іншого боку, рівень температур вторинної пари потребує серйозного аналізу під час оцінювання енергетичної ефективності.

У статті під час розрахунків двоступеневих і чотириступеневих циклів прийнято найбільш жорсткі температурні режими. Пом'якшення режимів можливе шляхом зниження тиску в дегідраторі.

Висновки. Комбіноване використання електродинамічних систем і теплових насосів є новим технічним рішенням у проблемі вдосконалення обладнання для дегідратації. Ефект такого напряму пов'язаний із розумінням науково-технічного протиріччя, що виникає при взаємодії електромагнітного поля та термотрансформаторів. При цьому, формування реверсних потоків енергії здатне значно підвищити підсумковий енергетичний ККД обладнання. У роботі представлено методику розрахунку енергетичного ККД з урахуванням формування таких реверсних потоків. Проведений обчислювальний експеримент показав, що для двоступеневих апаратів із тепловими насосами підсумковий ККД можна підвищити з 0,4 до 0,6, а для чотириступеневих дегідраторів з 0,4 до 0,8. Результати роботи дають можливість перейти до проєктування дослідно-промислового зразка багатоступінчастого дегідратора з електродинамічними та теплонасосними системами.

References

1. Salehi F. (2021). Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 546-555. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746
2. Aktaş M., Taşeri L., Şevik S., Gülcü M., Seçkin G.U., Dolgun E.C. Heat Pump Drying of Grape Pomace: Performance and Product Quality Analysis, *Drying Technology*, 2019, P. 1766—1779, https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536983
3. Zhang T., Yan Z.W., Wang L.Y., Zheng W.J., Wu Q., Meng Q.L. (2021). Theoretical Analysis and Experimental Study on a Low-Temperature Heat Pump Sludge Drying System, *Energy*, , Volume 214, https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118985
4. Doymaz İ., Tunçkal C., Göksel Z. (2023). Comparison of drying kinetics, energy efficiency and color of dried eggplant slices with two different configurations of a heat pump dryer, Energy Sources, *Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Volume 45, 690-707 https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2169415

5. Babu A.K., Kumaresan G., Raj V.A.A., Sharmila Babu V.S. (2023). Numerical simulation of heat pump thin layer drying of Amaranth leaves, Energy Sources, *Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Volume 45, 9383-9395, https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2232737
6. Aktaş M., Khanlari A., Amini A., Şevik S. (2017). Performance analysis of heat pump and infrared—heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Conversion and Management*, Volume 132, 327-338, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027
7. Babu A.K., V. Raj A.A., Velraj R., Govindaraj K. (2020) Experimental Investigations of Thin-layer Drying of Leaves in a Heat-Pump Assisted Tray-type Batch Drying Chamber, *Journal of Mechanical Engineering* 66 (4), 254-265. Doi:10.5545/sv-jme.2019.6510

COMBINED SYSTEM OF MICROWAVE DEHYDRATOR WITH HEAT PUMP EVAPORATORS

Burdo O. G., Slavinska V. O.
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. *An analysis of the electromagnetic dehydrators developed by the authors is carried out, a reserve for reducing energy consumption is determined, provided that steam energy is utilised by its thermal transformation. Significant disadvantages of evaporators and methods of solving existing problems and contradictions are revealed. The combination of the influence of the microwave field and the heat pump on the system is proposed. Innovative methods of dehydration using heat pumps in the food industry are considered. A schematic diagram of an energy-efficient two-stage electrodynamic dehydrator with a heat pump is formed. A comparison of energy efficiency indicators of various traditional dehydration technologies and the proposed innovative device has been carried out. A methodology for calculating the energy efficiency of systems with forward and reverse energy flows is presented. Schemes of multi-stage dehydrators with heat pumps are analysed. The results of a computer experiment with a two-stage and a four-stage dehydrator are presented. It is shown how the overall efficiency increases due to the formation of reverse flows. The issues of optimisation of systems with reverse flows are considered. It is shown that the use of an electrodynamic apparatus at the last stage allows obtaining a highly concentrated high-quality solution, and the use of secondary steam energy on the basis of heat pumps can significantly increase the energy efficiency of the system. An innovative installation with combined systems of electrodynamic and heat pump types is proposed. The modes of its operation and optimisation are determined.*

Keywords: microwave electrodynamic dehydrators, heat pumps, energy efficiency, reverse energy flows.

Список використаної літератури

1. Salehi F. Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. *International Journal of Fruit Science*, 2021, P. 546-555. https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746
2. Aktaş M., Taşeri L., Şevik S., Gülcü M., Seçkin G.U., Dolgun E.C. Heat Pump Drying of Grape Pomace: Performance and Product Quality Analysis, *Drying Technology*, 2019, P. 1766—1779, https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1536983
3. Zhang T., Yan Z.W., Wang L.Y., Zheng W.J., Wu Q., Meng Q.L. Theoretical Analysis and Experimental Study on a Low-Temperature Heat Pump Sludge Drying System, *Energy*, 2021, Volume 214, https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118985
4. Doymaz İ., Tunçkal C., Göksel Z. Comparison of drying kinetics, energy efficiency and color of dried eggplant slices with two different configurations of a heat pump dryer, Energy Sources, *Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, Volume 45, P. 690-707 https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2169415
5. Babu A.K., Kumaresan G., Raj V.A.A., Sharmila Babu V.S. Numerical simulation of heat pump thin layer drying of Amaranth leaves, Energy Sources, *Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2023, Volume 45, P. 9383-9395, https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2232737
6. Aktaş M., Khanlari A., Amini A., Şevik S. Performance analysis of heat pump and infrared—heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology, *Energy Conversion and Management*, 2017, Volume 132, P. 327-338, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.027
7. Babu A.K., V. Raj A.A., Velraj R., Govindaraj K. Experimental Investigations of Thin-layer Drying of Leaves in a Heat-Pump Assisted Tray-type Batch Drying Chamber, *Journal of Mechanical Engineering* 66(2020)4, P.254-265. Doi:10.5545/sv-jme.2019.6510

Отримано в редакцію 12.07.2024 Received 12.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024 Approved 25.09.2024