

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕВОДНЕННЯ КУКУРУДЗИ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ВІДЦЕНТРОВИХ ПОЛІВ

Коцур І.О., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. Розглянуто експорт зернових продуктів, як ключовий фактор для економіки України. Процес дегідратації зернових продуктів є одним із важливих при перевалці сировини, в сьогоденні використовується конвективне сушіння з використанням енергії спалювання природного газу. Дослідження зосереджені на пошуку інноваційних методів зневоднення для підвищення ефективності цього процесу. Проведено аналіз літератури на сучасні методи дегідратації сировини, зокрема харчової та фармацевтичної, з акцентом на потенціал на комбінованих методів сушіння, зокрема з використанням мікрохвильового поля, що забезпечує швидку дегідратацію, збереження поживних речовин та покращення якості продукту. Побудовано параметричну модель для комбінованого процесу зневоднення з використанням комбінованої дії електромагнітного та відцентрових полів. Об'єктами експериментальних досліджень була кукурудза. Експериментальний стенд включав центрифугу та джерело електромагнітної енергії. Отримано кінетику зневоднення з використанням трьох режимів експериментальних досліджень. Аналіз експериментів показав, що підвищення частоти обертів центрифуги знижує енергетичні витрати, режим обробки сировини в мікрохвильовому полі при 25 секундах забезпечує ефективну дегідратацію без утворення водяної плівки, яка перешкоджає проникненню енергії. Експериментальні дослідження показали, що зневоднення кукурудзи у мікрохвильовому та відцентровому полях при потужності 4300 Вт/кг і частоті 1000-3000 об/хв дозволяє витратити лише 1,67...2.7 МДж/кг волози, тоді як традиційні технології витрачають понад 4 МДж/кг. Стаття підкреслює перспективність використання мікрохвильового поля та відцентрових сил для покращення ефективності процесів дегідратації.

Ключові слова: зневоднення, дегідратація, комбіновані дії, електромагнітне поле, відцентрове поле.

Вступ. Експорт зернових продуктів є важливим для України з кількох причин. По-перше, це один з головних експортних товарів, що приносить значний обсяг валютних надходжень, оскільки пшениця, кукурудза, ячмінь та інші зернові продукти користуються великим попитом на світовому ринку. По-друге, експорт підтримує аграрний сектор, який є однією з найбільших галузей економіки України і забезпечує зайнятість мільйонів людей, особливо у сільських районах.

Процес дегідратації зернових продуктів є одним із важливих при перевалці сировини та має важливе значення для харчової промисловості. В більшості випадків, сушіння сировини в світі відбувається традиційними методами сушіння. Основним способом - це використання конвективних теплових сушарок, які використовують енергію спалювання природних копалин, наприклад природний газ для підігрівання сушильного агента - повітря [ЕСУ]. Тому предметом дослідження є інноваційні методи зневоднення зернопродуктів. Дослідити способи підвищення [1, 2] ефективності, де об'єктом дослідження, являють процеси зневоднення харчової сировини.

Аналіз літературних даних і формулювання проблеми. Тема дегідратації сировини є затребуваною в світі, багато науковців досліджували, як комбіновані методи дегідратації так і окремі на різній сировині, а саме від харчової до фармацевтичної. Наразі, динамічно зростає інтерес до інноваційних методів сушіння в умовах електромагнітних полів. John Smith, Maria Johnson визначили потенціал мікрохвильової енергії у поєднанні з вакуумним середовищем для швидкої дегідратації продуктів. Цей метод забезпечує рівномірне видалення вологи та збереження поживних речовин [5]. Li Zhang, Wei Wang проаналізували та оптимізували системи комбінованого сушіння картоплі гарячим повітрям та мікрохвильовим полем. Дослідження показало значне покращення якості кінцевого продукту [6]. Michael Brown визначив виборку покращень гібридних методів сушіння, які дозволяють значно скоротити час сушіння та енергоспоживання при збереженні поживних та сенсорних якостей продуктів [7]. Sarah Lee, David Green дослідили комбінації осмотичного та мікрохвильового сушіння, що дозволяє покращити процес видалення вологи та зберегти якість продукту [8]. Helen White, Thomas Black визначили виборку нових технологій дегідратації, включаючи гібридні методи, які сприяють сталому розвитку та покращенню якісних характеристик продуктів [9]. Chun Li, Fang Liu дослідили умови сушіння цитрусових продуктів з використанням мікрохвиль та гарячого повітря, спрямоване на оптимізацію процесу для досягнення найкращих результатів [10]. Kimberly Brown зробив огляд мікрохвильового піролізу опадів, що розглядає механізми, обладнання та перспективи використання цього методу для ефективного видалення вологи та переробки відходів [11]. Rajesh Kumar, Emily Davis проаналізували методи мікрохвильового екстрагування біоактивних сполук з рослинних матеріалів, який дозволяє значно

прискорити процес та покращити якість кінцевого продукту [12].

А. N. Other та EnWave Corporation досліджували процес видалення ефірних олій із апельсинової шкірки за допомогою комбінації мікрохвильового нагріву та центрифуги. Це дозволяє значно прискорити та покращити процес дегідратації в порівнянні з традиційними методами [3],[4].

Таким чином, проведений аналіз дозволяє визначити наступні науково-технічні протиріччя.

1. Традиційні методи конвективного сушіння енергоємні та не забезпечують необхідної якості продукту, не виключають можливість канцерогенного забруднення.
2. Дослідження процесів зневоднення при дії електромагнітних джерел енергії обмежуються лабораторними стендами.
3. Перспективними є методи комбінованої дії процесів із різними рушійними силами, особливо мікрохвильовими та механічними.

Вирішення визначених протиріч пропонується на основі науково – технічній гіпотези комбінованої системи дегідратації. Пропонується зняти з повітря задачу теплоносія, а залишити тільки завдання дифузійного середовища. А в якості джерела енергії використати електромагнітні та відцентрові поля. Зниження енерговитрат в зневодненні зернових продуктів можливо досягти при поетапній організації процесів: використання мікрохвильових джерел енергії дозволить, вологу із об'єму твердої фази, доставляти на поверхню продукту; на другому етапі – залучати інерційні поля для вилучення вологи з поверхні продукту.

Предмети та методи досліджень. Предметом досліджень були процеси зневоднення кукурудзи. Порядок проведення серії експериментів (рис. 1).



Рис. 1 – Цикл експериментального дослідження

В експериментальних дослідженнях температура сировини вимірювалася пірометром марки «FLIR TG54», витрати енергії для обладнання – енергоміром марки «Feron TM55», вологу кукурудзи – вологоміром марки «Wile 66». За допомогою цифрових ваг марки «Техноваги ТВЕ 2.1» визначали втрату вологи.

Основні результати досліджень. На основі гіпотези процесу зневоднення сировини з поетапним використанням дії мікрохвильових та відцентрових полів, було розроблено параметричну модель (рис. 2). Модель визначила, що потрібно виділити, та які задачі потрібно вирішити для мікрохвильового об'єкту та відцентрової системи.

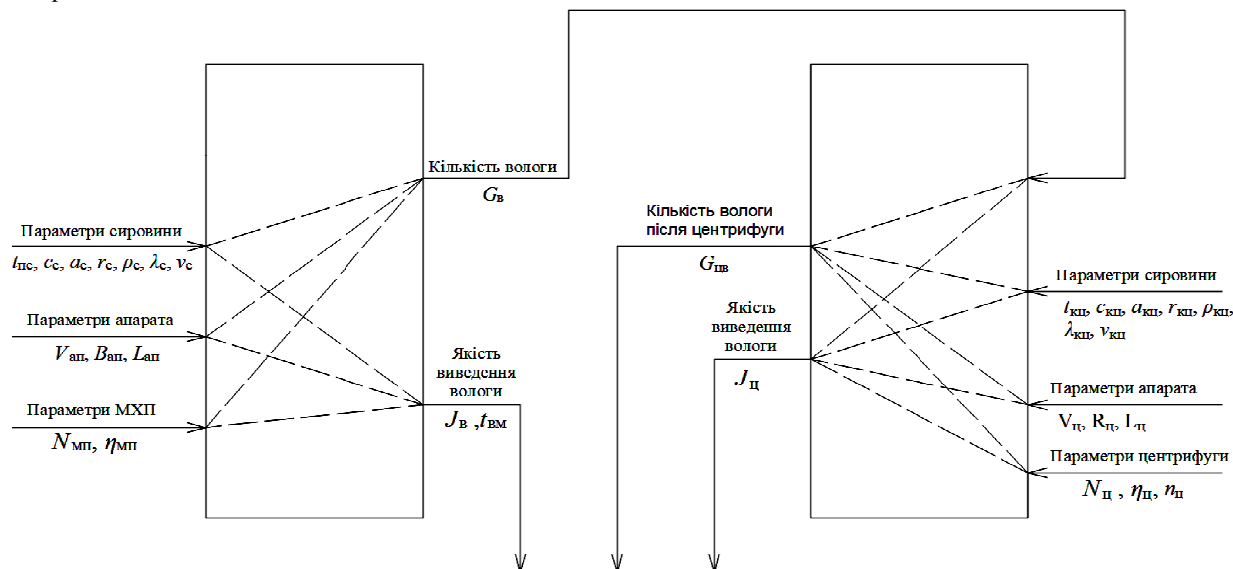


Рис. 2 – Параметрична модель

З параметричної моделі слідує, що є певні вхідні параметри, які впливають на вихідні параметри якості етапу мікрохвильової обробки і певні вхідні параметри, які впливають на етап обробки відцентровим полем.

Для етапу обробки мікрохвильового поля є важливими параметри, а саме потужність ($N_{мп}$) та ККД ($\eta_{мп}$) магнетрону, а також час роботи (τ) цієї ділянки. Змінюючи параметр часу, ми будемо мати різний результат обробки сировини, а саме різну кількість виведеної вологи на поверхню сировини.

Для етапу обробки відцентровим полем є важливими вхідними параметри, це параметр сировини з кількістю вологи, який успадковується від етапу обробки в МХП. Та основний параметр центрифуги - це швидкість обертів барабану.

Проведені лабораторні експерименти, під різними впливами вхідних параметрів для етапів МХП і відцентрової сили. На першій серії дослідження для етапу обробки кукурудзу в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 20$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 3).

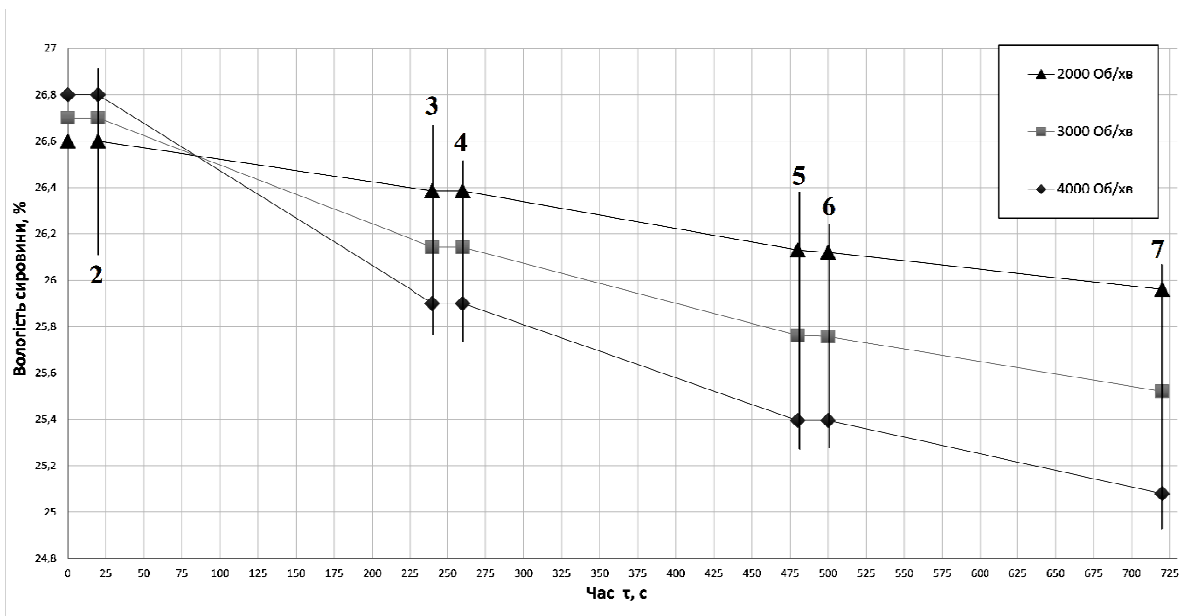


Рис. 3 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні першого комбінованого режиму

На рис. 2, 3, 4 прийнято позначення: (1 – 2, 3-4, 5-6 – обробка в МХ полі; 2-3, 4-5, 6-7 – обробка у центрифугі)

Друга серія експериментів для етапу обробки в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 25$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 4).

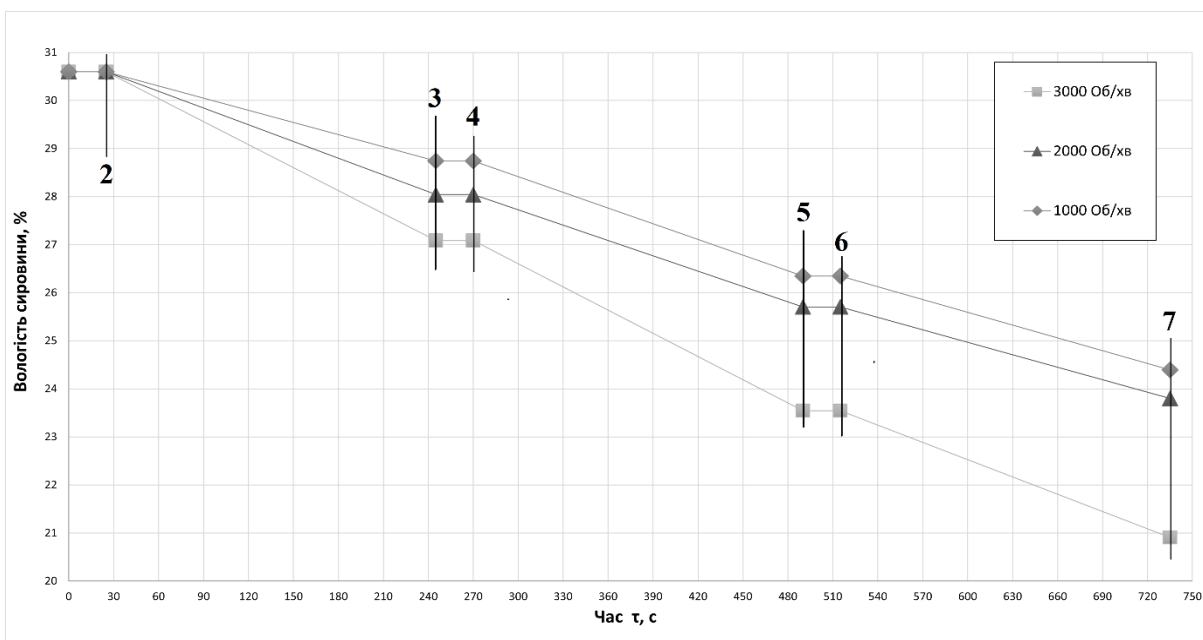


Рис. 4 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні другого комбінованого режиму

Для етапу обробки в МХП були вхідні параметри магнетрону $N_{\text{мп}} = 215$ Вт, $\eta_{\text{мп}} = 85\%$ та час обробки $\tau = 30$ с, а для обробки в другому етапі за допомогою центрифуги вхідні параметри швидкості $n_{\text{ц}} = 2000$ Об/хв, $n_{\text{ц}} = 3000$ Об/хв та $n_{\text{ц}} = 4000$ Об/хв. (рис. 5).

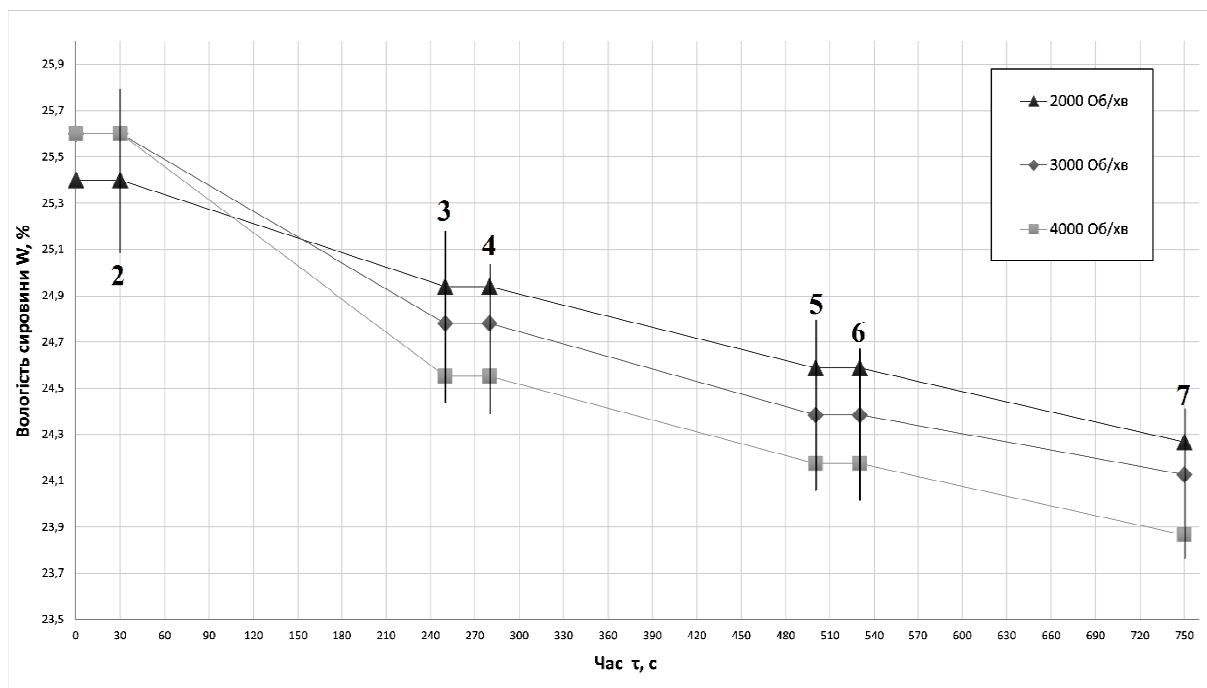


Рис. 5 – Кінетика зневоднення кукурудзи при використанні другого комбінованого режиму

Енерговитрати досліджень трьох режимів обробки сировини в МХП, та по три режими видалення воло- ги за допомогою відцентрового поля з різною швидкістю наведено в рис. 6.

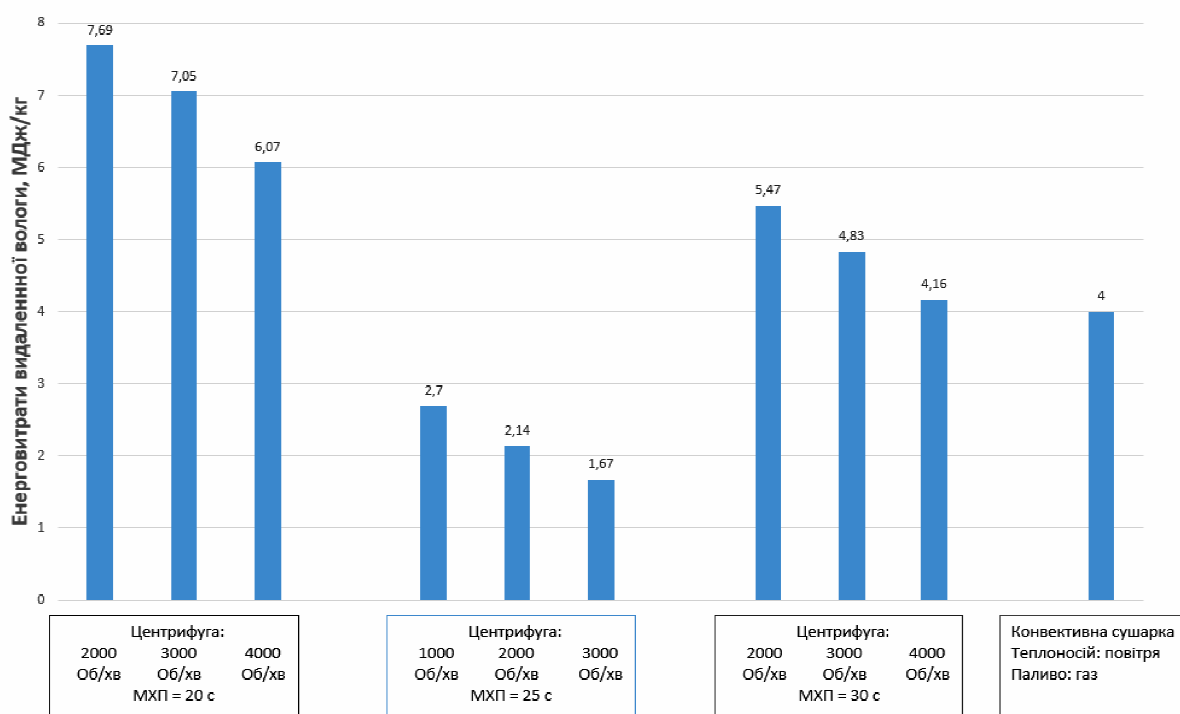


Рис. 6 – Енергетика процесів зневоднення кукурудзи

Аналіз результатів експериментів (рис.6) показує, що підвищення частоти обертів центрифуги в усіх режимах приводить до зниження сумарних енергетичних витрат. Вплив режиму обробки у МХП має більш складний характер. Якщо сировина оброблялась 20 с, то недостатньо воло- ги вилучалось на поверхню, менш ефективно йшла обробка у центрифугі. При обробці у МХП 30 с, на поверхні зерен формувалась плівка води, яка ставала бар'єром для проникнення електромагнітної енергії у глибину зернівки. Енергія стала витрачатися на випаровування воло- ги у самому електромагнітному апараті. Рациональні режими обробки МХП при вибраній потужності магнетрона – 25 с.

Висновки

1. Традиційні методи конвективного сушіння зернових потребують забагато енергії та не виключають канцерогенного забруднення продукту.

2. В останні роки динамічно зростає інтерес до використання електромагнітних джерел енергії в процесі зневоднення сировини.

3. Розвиваються технології комбінованої дії на сировину при її зневодненні різними джерелами енергії із різними рушійними силами. Оптимізація таких технологій потребує узгодження часу та потужностей із розходом сировини та її типом.

4. Найбільші резерви по зменшенню загальних енергетичних витрат мають комбінації «мікрохвильових та механічних джерел».

5. Експериментальні дослідження зневоднення кукурудзи послідовно у мікрохвильовому та відцентровому полях при питомій потужності 4300 Вт/кг, в діапазоні 1000...3000 обертів в хвилину, за різним часом обробки у МХП дали змогу витратити 1,67 МДж/кг вологи. Для зрівняння традиційні технології витрачають 4 МДж/кг та більше.

6. Параметрами оптимізації комбінованої системи «мікрохвильове поле – відцентрове поле» є питома потужність, частота обертів, час обробки у мікрохвильовому полі та у відцентровому полі.

References

1. Burdo O.G. (2010). *Evolutsiya sushyl'nyh ustanovok [Evolution of dryers]*. Odessa, Poligraf.
2. Burdo O.H., Trishyn F.A., Yarovyi I.I. (2020). *Enerhetychni monitorynh kharchovykh ta pererobnykh vyrobnystv [Energy monitoring of food and processing industries]*, Odesa, Madzhenta
3. A. N. Other (2021). Dehydration by coupling centrifuge drainage with microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 120. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
4. EnWave Corporation. (2023). What is REV? Vacuum Microwave Dehydration Technology. EnWave Corporation, 1. DOI 10.3390/enwave.2023.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
5. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
6. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
7. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods (MDPI)*, 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI](<https://doi.org/10.3390/foods12183437>)
8. Sarah Lee, David Green. (2019). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42. DOI 10.1111/jfpp.12578. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Helen White, Thomas Black. (2022). The use of emerging dehydration technologies in developing sustainable systems. *Sustainable Food Systems*, 8. DOI 10.1016/j.susfs.2022.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
10. Chun Li, Fang Liu. (2019). Study on operating conditions of orange drying processing with microwave and hot air. *Drying Technology*, 35. DOI 10.1080/07373937.2017.1300789. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
11. Kimberly Brown. (2021). Microwave pyrolysis of sludge: a review. *Environmental Engineering Science*, 38. DOI 10.1089/ees.2021.0109. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
12. Rajesh Kumar, Emily Davis. (2019). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials using microwave energy. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 15. DOI 10.1016/j.jarmap.2019.100231. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)

RESEARCH OF THE DEHYDRATION PROCESSES OF CORN UNDER THE CONDITIONS OF THE COMBINED EFFECT OF ELECTROMAGNETIC AND CENTRIFUGAL FIELDS

Kotsur I.O., graduate student
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. The export of grain products is considered as a key factor for the economy of Ukraine. The process of dehydration of grain products is one of the important ones in the transshipment of raw materials, nowadays convective drying is used using the energy of burning natural gas. Research is focused on finding innovative methods of dehydration to improve the efficiency of this process. An analysis of the literature on modern methods of dehydra-

tion of raw materials, in particular food and pharmaceutical, was carried out, with an emphasis on the potential of combined methods of drying, in particular using a microwave field, which ensures rapid dehydration, preservation of nutrients and improvement of product quality. A parametric model for the combined process of dehydration using the combined action of electromagnetic and centrifugal fields was built. Corn was the object of experimental research. The experimental stand included a centrifuge and a source of electromagnetic energy. Dehydration kinetics were obtained using three modes of experimental research. The analysis of experiments showed that increasing the frequency of rotation of the centrifuge reduces energy costs, the mode of processing raw materials in the microwave field at 25 seconds provides effective dehydration without the formation of a water film that prevents the penetration of energy. Experimental studies have shown that dehydration of corn in microwave and centrifugal fields at a power of 4300 W/kg and a frequency of 1000-3000 rpm allows to consume only 1.67...2.7 MJ/kg of moisture, while traditional technologies consume more than 4 MJ/kg. The article emphasizes the perspective of using a microwave field and centrifugal forces to improve the efficiency of dehydration processes.

Keywords: dehydration, combined actions, electromagnetic field, centrifugal field.

Список використаних джерел

1. Burdo O.G. *Evolutsiya sushyl'nyh ustanovok*. Odessa, Poligraf, 2010. 368 p.
2. Бурдо О. Г. Енергетичний моніторинг харчових і переробних виробництв : підручник / Олег Григорович Бурдо, Федір Анатолійович Трішин, Ігор Іванович Яровий. – Одеса : Маджента, 2020. – 244 с.
3. A. N. Other. (2021). Dehydration by coupling centrifuge drainage with microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 120. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2021.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
4. EnWave Corporation. (2023). What is REV? Vacuum Microwave Dehydration Technology. EnWave Corporation, 1. DOI 10.3390/enwave.2023.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
5. John Smith, Maria Johnson. (2019). Combined Microwave Vacuum Drying. *Food Science and Technology International*, 25. DOI 10.1016/j.foodsci.2019.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
6. Li Zhang, Wei Wang. (2020). Optimization of hot-air microwave combined drying control system based on potatoes. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. DOI 10.1016/j.ijfst.2020.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
7. Michael Brown, et al. (2023). Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration. *Foods (MDPI)*, 12. DOI 10.3390/foods12183437. [MDPI](<https://doi.org/10.3390/foods12183437>)
8. Sarah Lee, David Green. (2019). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot air drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42. DOI 10.1111/jfpp.12578. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
9. Helen White, Thomas Black. (2022). The use of emerging dehydration technologies in developing sustainable systems. *Sustainable Food Systems*, 8. DOI 10.1016/j.susfs.2022.110638. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
10. Chun Li, Fang Liu. (2019). Study on operating conditions of orange drying processing with microwave and hot air. *Drying Technology*, 35. DOI 10.1080/07373937.2017.1300789. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
11. Kimberly Brown. (2021). Microwave pyrolysis of sludge: a review. *Environmental Engineering Science*, 38. DOI 10.1089/ees.2021.0109. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)
12. Rajesh Kumar, Emily Davis. (2019). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials using microwave energy. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 15. DOI 10.1016/j.jarmap.2019.100231. (<https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000652524800012>)

Отримано в редакцію 12.08.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 12.08.2024
Approved 25.09.2024