

УДК 66.061.3: 621.3.011.5: 664.3: 633.85: 674.032.1: 539.2

DOI: 10.15673/swonaft.v88i2.3130

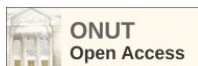
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ В АПАРАТАХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТИПУ

Запорожець Д., аспірант, Молчанов М.Ю., асистент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

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. У статті розглянуто сучасні підходи до інтенсифікації процесів екстрагування біологічно активних компонентів із рослинної сировини із застосуванням електродинамічних апаратів. Особливу увагу приділено аналізу ефективності вилучення цільових речовин у порівнянні з традиційними методами екстрагування, які передбачають термічне нагрівання. Об'єктами дослідження процесу екстрагування обрано соняшникову макуху, що є відходом виробництва олії, та деревину дуба, яка містить цінні водо- і спирторозчинні компоненти. Показано, що застосування мікрохвильового поля та ефекту адресної доставки енергії значно підвищує швидкість та ефективність екстрагування навіть за умов низької температури (до 50 °С), що сприяє збереженню термолабільних речовин.

Запропоновано експериментальну методіку оцінки ефективності процесів дегідратації в капілярах під дією мікрохвильового випромінювання. Визначено, що найбільша енергоефективність досягається при коротких високопотужних імпульсах. У статті також розглядається вплив механодифузії як додаткового механізму переносу речовин з капілярів твердої фази до екстрагенту. Отримані результати свідчать про значну перевагу електродинамічного екстрагування в порівнянні з традиційним способом підведення енергії. Зокрема при вилученні соняшникової олії етанолом, розчинність тригліцеридів в якому є обмеженою, частина олії переходить до екстракту у вигляді емульсії. Це дозволяє підвищити вихід продукту, та впровадити у виробництво етанол як відновлюваний та екологічно безпечний екстрагент.

Ключові слова: екстрагування, електродинамічні апарати, мікрохвильове поле, механодифузія, адресна доставка енергії, олія, емульгування, рослинна сировина, соняшникові макуха, дуб.

Вступ. У сучасних умовах зростаючого дефіциту енергетичних та природних ресурсів особливої актуальності набувають питання енерго- та ресурсоефективності в технологіях переробки рослинної сировини. Процеси переробки рослинної сировини часто передбачають екстрагування цільових компонентів: олій, смако-ароматичних, біологічно активних речовин та пігментів.

Обробка сировини зі складним хімічним складом і капілярно-пористою структурою є проблемою для традиційного екстракційного обладнання, оскільки вимагає використання органічних розчинників, додаткову обробку сировини, високих енерговитрат.

Проблеми підвищення енергетичної ефективності екстрагування постають як у олійно-жировому виробництві, так і у виробництві смако-ароматичних та біологічно активних екстрактів.

Україна є одним з провідних виробників соняшникової олії [1], після пресування якої залишаються великі обсяги відходів – макухи. Макуха містить від 15% олії, білок, клітковину, фосфоліпіди, лецитин. На підприємствах олійно-жирової промисловості з макухи вилучають олію екстрагуванням [2]. Для екстрагування використовують гексан, нефрас, ацетон. Сучасні вимоги до екологічної безпеки продукції привертають увагу до етанолу в якості екстрагенту [3]. Відомі дослідження з екстрагування соняшникової олії абсолютним (99,5 – 98%) етанолом в умовах традиційного підведення енергії [4], та в умовах ультразвукової інтенсифікації [3]. Оскільки абсолютний етанол має вищу вартість та більш вимогливий до умов зберігання, основною проблемою в даному напрямку є обмежена розчинність олій в етанолі ректифікованому та водно-спиртових розчинах, які на підприємствах можна використовувати повторно після відгонки від місцели. Вбачається можливість перенесення олії до екстракту не тільки за рахунок розчинення, а й за рахунок емульгування [5].

Глобальний ринок екстрактів дуба демонструє стійке зростання, що свідчить про підвищений інтерес до натуральних та ефективних інгредієнтів [6]. Водні екстракти дуба як і спиртові мають великий перелік

корисних властивостей, включаючи протизапальну, антимікробну та антиоксидантну дію. Водні екстракти знаходять широке застосування в медицині, косметології, стоматології та харчовій промисловості. Спиртові екстракти активно використовуються в алкогольній промисловості для надання напоям дубового аромату.

Використання в процесі екстрагування апаратів електродинамічного типу скомбінованих з впливом ультразвуку, що досліджені в роботі [7] і з додатковим термічним нагрівом, досліджені в роботі [8] говорять про значний вплив мікрохвильового поля на інтенсифікацію процесу.

На кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту електродинамічне екстракційне обладнання показало високу ефективність у процесах екстрагування водорозчинних речовин кави [9], спирторозчинних компонентів деревини дубу [10], а також олій амаранту [11], кави [12].

Об'єкти та методи досліджень. Для дослідження інтенсифікації процесу екстрагування в електродинамічних апаратах було обрано деревину дуба, яка має жорстку капілярно-пористу структуру та містить водо- та спирторозчинні смакоароматичні та біологічно активні компоненти, та макуху соняшника - олієвмісну сировину, цільовим компонентом у якій є олія. Для дослідів макуха з олійністю близько 17% подрібнювалась на лабораторних млинах та шляхом просіювання на ситах розподілялась на фракції за розміром частинок. Досліди проводились з гексаном та 96% та 91% етанолом. Деревину дубу екстрагували водою та етанолом.

Досліди проводились на експериментальному об'ємному електродинамічному екстракторі періодичної дії, розробленому на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту, циркуляційному мікрохвильовому екстракторі, та лабораторній водяній бані ВБ-2, а також на стенді для дослідження механодифузії. Для обробки експериментальних зразків використовувались сушильна шафа 2В-151, ваги аналітичні Radwag - 220, центрифуга ЦЛС-3.

Обговорення результатів. Для візуалізації явища механодифузії та визначення впливу мікрохвильового випромінювання, проведено серію дослідів у мікрохвильовій резонаторній камері на капілярах з радіопрозорого матеріалу. Оскільки будь яка свіжа, не висушена рослинна сировина має в своєму складі воду, в ролі рідини якою заповнено капіляри була дистильована вода. Отримані дані заносились до таблиці 1 для визначення рекомендацій щодо ефективного використання мікрохвильового поля під час обробки рослинної сировини в апаратах електродинамічного типу.

Таблиця 1

Дослідження поведінки рідини в капілярах у умовах дії мікрохвильового поля

Приведена енергія – Q_e , кВт/кг	Час початку викидів – $t_{\text{поч}}$, с	Час піку викидів - $t_{\text{пик}}$, с	Час затухання викидів – $t_{\text{зат}}$, с	Мінімальні енерговитрати на піку процесу – N , МДж/кг	Максимальна маса викиду під час процесу - $M_{\text{м}}$, г	Початкова маса пучка - $M_{\text{поч}}$, г	Кінцева маса пучка – $M_{\text{кін}}$, г	Час дегідратації - $t_{\text{д}}$, с	Маса рідини в пучку загальна - $M_{\text{заг}}$, г	Маса рідини видаленої з пучка - $M_{\text{вид}}$, г	Ефективність дегідратації - $\eta_{\text{дег}}$, %	Продуктивність процесу - C , кг/с
42,4	20	55	80	2,1	3,2	109,2	91,2	80	22,8	18	78,95	0,000225
33,9	25	50	75	1,7	3,3	129,8	110,6	75	28,5	19,2	67,37	0,000256
28,3	30	75	135	2,2	1,2	162	136,9	135	34,2	25,1	73,39	0,000186
24,2	25	50	145	1,7	2,6	193	164,3	145	39,9	28,7	71,93	0,000198
21,2	35	85	180	1,5	5,6	216,2	182,5	180	45,6	33,7	73,90	0,000187
20,8	35	90	120	1,35	3,7	270,1	225,1	120	57	45	78,95	0,000375
18,8	35	115	180	1,5	2,2	247,7	204,8	180	51,3	42,9	83,63	0,000238
16,9	50	105	180	1,4	2,7	268,3	229,2	180	57	39,1	68,60	0,000217
16,8	55	110	180	1,4	2,7	270,7	229,1	145	57	41,6	72,98	0,000287
12,7	30	150	220	1,5	2,5	269,6	228,6	220	57	41	71,93	0,000186
10	55	185	300	1,6	1,5	272,1	230,9	300	57	41,2	72,28	0,000137
5,6	165	340	380	1,3	1,7	273,8	229,7	380	57	44,1	77,37	0,000116

Відповідно до таблиці 1 створено гістограму залежності маси видаленої вологи від кількості витраченої на це енергії (рис. 1).

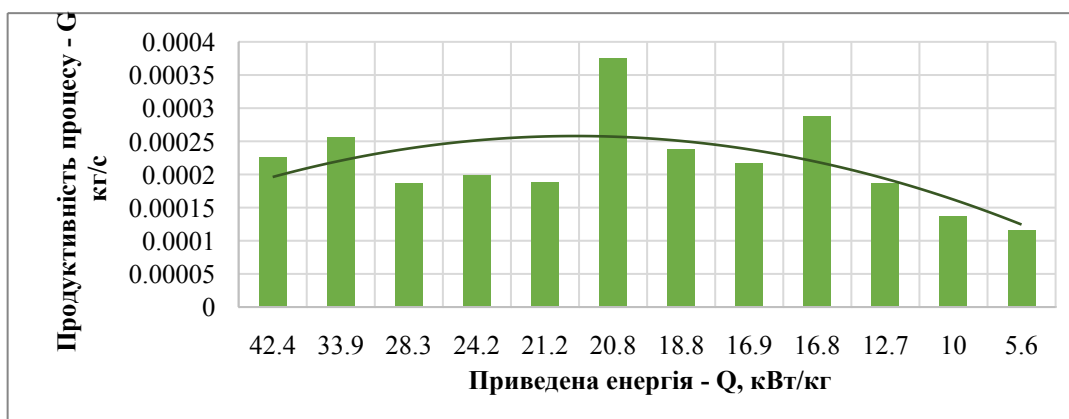


Рис. 1 – Залежність маси видаленої рідини від витраченої енергії

З гістограми (рис. 1) визначено, що найбільша продуктивність була при $Q = 20,8$ кВт/кг та $16,8$ кВт/кг, але процес проходив довше ніж на $Q = 42,4$ кВт/кг та $33,9$ кВт/кг на 50 – 75 секунд як показано на рис. 2.

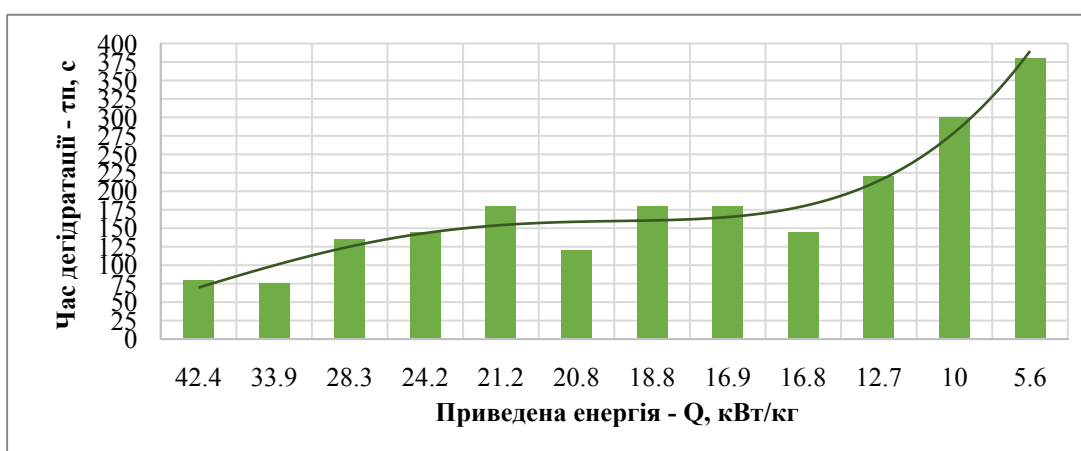


Рис. 2 – Залежність часу дегідратації від витраченої енергії

З графіків впливу мікрохвильового поля на збільшену модель капілярів рослинної сировини визначено:

1. Експериментально зафіксовано що під час впливу мікрохвильового поля на сировину ефект викидів рідин має початок, пік та затухання. Вплив поля після піку є енергетично не доцільним бо процес стає млявим а енергія продовжує витрачатись, то ж доцільним є обробка сировини короткими потужними імпульсами.
2. Визначено що більша приведена енергія призводить до швидшого видалення вологи з капілярів, час витрачений на видалення вологи на мінімальній приведеній енергії був в 5 разів більший, ніж на максимальній.

Визначено що процес обробки має свій енергетичний пік коли досягається максимальна енергоефективність. Максимальна енергетична ефективність на піках процесу знаходилась в діапазоні 1,1 – 2,2 МДж/кг, що ефективніше ніж в умовах традиційного нагрівання.

Для визначення впливу ефекту механо дифузії на кінетику екстрагування рослинної сировини проведено досліді на циркуляційному електродинамічному екстракторі та водяній бані (традиційне підведення енергії). За даними отриманими після проведення дослідів створено кінетику зміни температури і концентрації екстракту у часі. Оскільки принцип обробки сировини різний аби порівняти досліді, постійним параметром обрано температуру екстрагента до 50°C (рис. 3 - 4).

Як видно з рис. 4, кінетика зміни концентрації екстракту під час обробки до 30 хвилини зростала майже рівномірно, після цієї відмітки концентрація на циркуляційному мікрохвильовому екстракторі почала зростати значно швидше.

Встановлено, що використання апаратів електродинамічного типу інтенсифікує процес обробки сировини, на відміну від традиційного, і за відносно низьких температур.

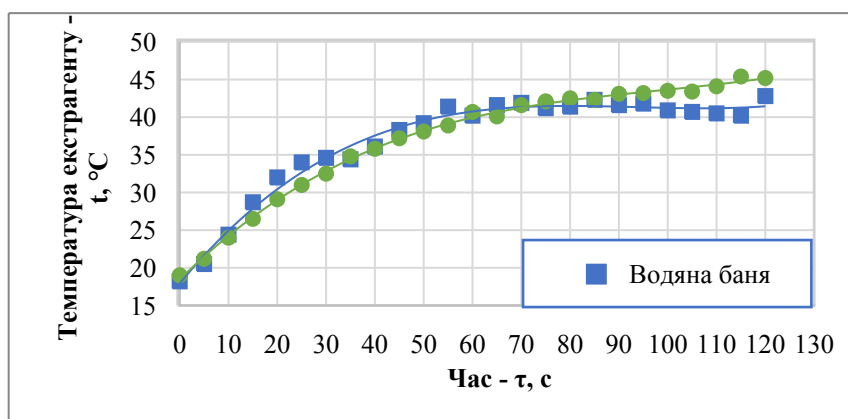


Рис. 3 – Кінетика зміни температури під час обробки

Спостерігалось що температура змінювалась подібним чином, і не перевищувала 50°C.

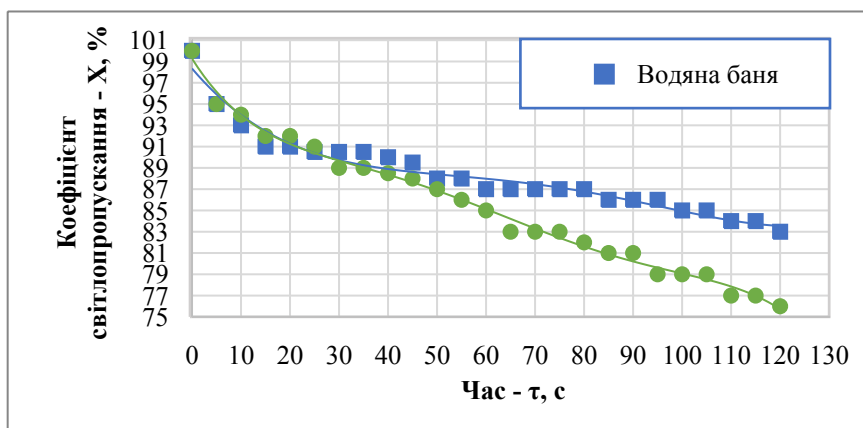


Рис. 4 – Кінетика зміни концентрації екстракту під час обробки

Для визначення впливу ефекту механоdifузії на кінетику екстрагування олії етанолом, проведено дослід в об'ємному періодичному вакуумному екстракторі, та на водяній бані. Попередньо було визначено розчинність соняшникової олії в етанолі. Дослідження виконувалось гравіметричним методом. Досліди проводились для температур, за яких отримали найбільший вихід олії: 70 °C та кипіння. Результати дослідів наведено у табл. 3

Таблиця 3

Розчинність соняшникової олії у етанолі різної концентрації

	96 %, 70 °C	96 %, кипіння	91 %, 70 °C	91 %, кипіння
Коефіцієнт розчинності, г/100 г	1,67	2,87	1,17	1,62

Таким чином, ефективність традиційних процесів екстрагування обмежується розчинністю олії в екстрагенті, оскільки від розчинності залежить рівноважна концентрація продукту та рушійна сила процесу. Порівняння виходу олії під час екстрагування етанолом з розчинністю наведено у таблиці 4.

Таблиця 3

Вихід олії в порівнянні з розчинністю олії в екстрагенті

Дослід	Вихід, г/100 г екстракту	Розчинність, г/100 г розчину	Вміст олії у екстракті у % від розчинності
Традиційний нагрів, кипіння, 720 кДж/кг	1,17	1,62	71,83
електродинамічний екстрактор, 720 кДж/кг	1,63	1,62	100,25
електродинамічний екстрактор, 1432 кДж/кг	1,35	1,62	83,29
електродинамічний екстрактор, 2430 кДж/кг	1,38	1,62	85,14

Встановлено, що в умовах адресної доставки енергії вихід олії більший, і за деяких режимів досягає, або перевищує розчинність олії в етанолі за даних умов. Тобто окрім класичного механізму розчинення задіяні інші механізми перенесення олії у потік екстрагенту. Явище механодифузії може виступати одним з таких механізмів. Наочно вплив електродинамічної інтенсифікації наведено на рис. 5, у досліді з однаковим гідромодулем, температурою та питомим енергопідведенням.

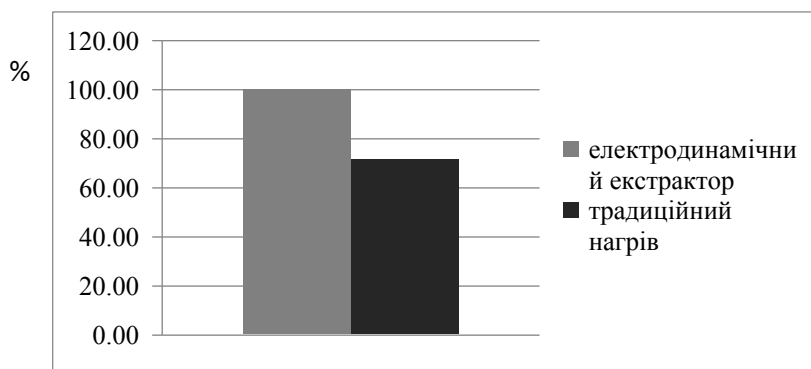


Рис. 5 – Вплив адресної доставки енергії на вихід олії у відсотках від розчинності

Спиртовий екстракт є складною сумішшю олії та інших спирторозчинних компонентів. Частка олії в екстракті, одержаному в електродинамічному екстракторі вища, як видно з рис. 6.

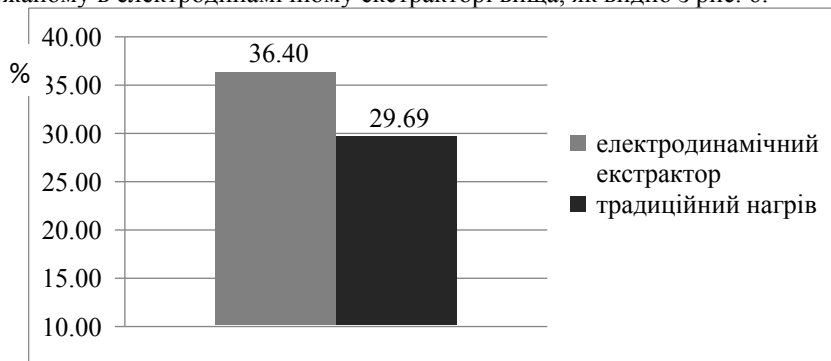


Рис. 6 – Залежність частки олії в екстрактивних речовинах з макухи соняшника від способу підведення енергії

Збільшення виходу олії пояснюється тим, що її частина викидається у потік екстрагенту у вигляді дрібних крапель шляхом механодифузії, які перебувають в екстракті у стані емульсії. Це узгоджується з результатами моделювання механодифузії у скляних капілярах.

Кінетику процесу екстрагування спостерігали за загальними екстрактивними речовинами в залежності від питомого підведення енергії, оскільки цей показник є ключовим для моделювання енергетичної ефективності процесу. Кінетичні криві наведено на рис. 7.

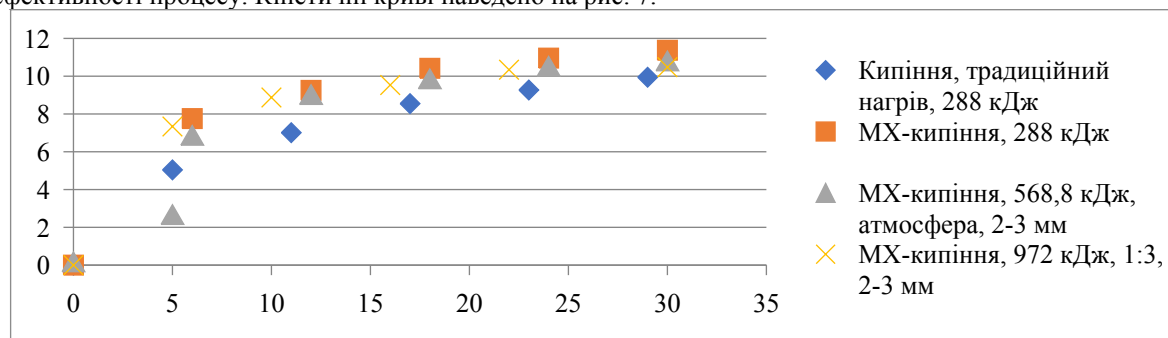


Рис. 7 – Кінетика виснаження твердої фази за часткою вилучених речовин відносно маси сировини в залежності від питомого підведення енергії

Як видно з рис. 7, в електродинамічному екстракторі сухі речовини переходять у екстракт інтенсивніше, причому, частка олії серед них вища, ніж при традиційному нагріванні. Менший вихід олії

за більших значень питомого підведення енергії імовірно пов'язаний з локальними перегрівами сировини під дією мікрохвиль та термічним пошкодженням капілярів, що ускладнює вихід олії до екстрагенту.

Висновки. Результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність електродинамічної інтенсифікації. Застосування електродинамічних апаратів значно підвищує ефективність екстрагування водорозчинних компонентів деревини, та спирторозчинних компонентів макухи соняшника порівняно з традиційними методами нагріву. Явище механо дифузії сприяє переходу олії в екстрагент не тільки через розчинення, а й за рахунок емульгування, що дозволяє перевищувати рівноважні значення вмісту олії в екстракті. Електродинамічне екстрагування дозволяє досягати високих результатів за відносно низьких температур (до 50°C), що важливо для збереження термолабільних речовин.

Список використаної літератури

1. Shevchenko A., Petrenko O., Helas V. (2024). Stratehichnyi rozvytok vyroshchuvannya soniashnyku v Ukraini [Strategic development of sunflower cultivation in Ukraine] *Economic Bulletin of the Black Sea Littoral*, 5, 133 – 145. <https://doi.org/10.37000/ebbsl.2024.05.11>
2. Терзієв, С., Ружицька, Н., Щербич, М., & Альхурі, Ю. (2021). Інтенсифікація процесу екстрагування в технологіях утилізації відходів харчових та олійних виробництв. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>
3. Moradi, Negin & Rahimi, Masoud & Moeni, Atefeh & Parsamoghadam, Mohammad. (2017). Impact of ultrasound on oil yield and content of functional food ingredients at the oil extraction from sunflower. *Separation Science and Technology*. 53. 10.1080/01496395.2017.1384016.
4. Інноваційні технології комплексної переробки насіння соняшнику : монографія / П. Ф. Петік, В. В. Гірман, В. Ю. Папченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Київ : Аграрна наука, 2018. – 176 с.
5. Xu, Qingyi & Nakajima, Mitsutoshi & Nabetani, Hiroshi & Iwamoto, Satoshi & Liu, Xinqi. (2001). The effect of ethanol content and emulsifying agent concentration on the stability of vegetable oil–ethanol emulsions. *Journal of Oil & Fat Industries*. 78. 1185-1190. 10.1007/s11745-001-0411-z.
6. Lesnoybalzam: [Веб-сайт]. Одеса, 2025. URL: https://www.lesnoybalzam.ru/dentists_advice/sila-koryduba?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 03.06.2025).
7. Vinatoru M., Mason T.J., Calinescu I. Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *Trends in Analytical Chemistry*, 2017, p. 159-178.
8. Chung-Hung C., Jian-Jiun L., Yusoff L., GekCheng R., Gek-Cheng N. A Generalized EnergyBased Kinetic Model for Microwave-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plants. *Separation and Purification Technology*, 2015, vol. 143. p. 152-160.
9. Бурдо О. Г., Бандура В. М., Ружицька Н. В., Макієвська Т. Л. Енергетичні аспекти харчових нанотехнологій. Наукові праці ОНАХТ. 2012. Вип. 42 (2), т. 2. С. 462-467.
10. Акімов, О., & Мординський, В. (2022). ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАГУВАННЯ ДЕРЕВИНИ ДУБА В АПАРАТАХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО ТИПУ. *Scientific Works*, 86(1), 100 - 105. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2410>
11. Кінетика екстрагування олії із насіння амаранту в мікрохвильовому полі: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.18.12 "Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв" / С. М. Капетуга ; наук. кер. О. Г. Бурдо ; Одес. нац. акад. харч. технологій. — Одеса : ОНАХТ, 2012. — 153 с.
12. Процеси переробки шламу в технологіях виробництва розчинної кави/ОГ Бурдо, СГ Терзієв, ВВ Шведов, НВ Ружицька//Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій].-2010.-Вип. 37.-С. 252-255.-Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2010_37_63

INTENSIFICATION OF EXTRACTION PROCESSES IN ELECTRODYNAMIC-TYPE APPARATUSES

Zaporozhets D.O., graduate student, Molchanov M.Yu., graduate student, assistant
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. In current paper, modern approaches to intensifying the extraction processes of biologically active compounds from plant raw materials using electrodynamic apparatus are considered. Particular attention is paid to analyzing the efficiency of target substance extraction in comparison with traditional extraction methods that

involve thermal heating. The study focuses on sunflower cake, a by-product of oil production, and oak wood, which contains valuable water- and ethanol-soluble components. It is demonstrated that the application of microwave fields and the effect of targeted energy delivery significantly increase the speed and efficiency of extraction even at low temperatures (up to 50 °C), which contributes to the preservation of thermolabile substances.

An experimental methodology is proposed for evaluating the efficiency of dehydration processes in capillaries under microwave irradiation. It is established that the highest energy efficiency is achieved through short high-power impulses. The article also considers the influence of mechanodiffusion as an additional mechanism for transferring substances from the capillaries of the solid phase to the extractant. The obtained results indicate a significant advantage of electrodynamic extraction over traditional methods of energy input. In particular, when extracting sunflower oil with ethanol – a solvent with limited triglyceride solubility – part of the oil transfers into the extract in the form of an emulsion. This makes it possible to increase product yield and enables the implementation of ethanol as a renewable and environmentally safe extractant in industrial processes.

Keywords: extraction, electrodynamic apparatus, microwave field, mechanodiffusion, targeted energy delivery, oil, emulsification, plant raw material, sunflower cake, oak wood.

References

1. Shevchenko A., Petrenko O., Helas V. (2024). Stratehichniy rozvytok vyroshchuvannya soniashnyku v Ukraini [Strategic development of sunflower cultivation in Ukraine] *Economic Bulletin of the Black Sea Littoral*, 5, 133 – 145. <https://doi.org/10.37000/ebbsl.2024.05.11>
2. Terziiev, S., Ruzhytska, N., Shcherbych, M., & Alkhuri, Yu. (2021). Intensification of the extraction process in food and oilseed productions waste utilization technologies. *Scientific Works*, 85(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2079>
3. Moradi, Negin & Rahimi, Masoud & Moeini, Atefeh & Parsamoghadam, Mohammad. (2017). Impact of ultrasound on oil yield and content of functional food ingredients at the oil extraction from sunflower. *Separation Science and Technology*. 53. 10.1080/01496395.2017.1384016.
4. Petik, P. F., Hirman, V. V., Papchenko, V. Yu., et al. (2018). Innovatsiini tekhnolohii kompleksnoi pererobky nasinnia soniashnyku [Innovative Technologies for Comprehensive Sunflower Seed Processing]. K: Ahrarna nauka.
5. Xu, Qingyi & Nakajima, Mitsutoshi & Nabetani, Hiroshi & Iwamoto, Satoshi & Liu, Xinqi. (2001). The effect of ethanol content and emulsifying agent concentration on the stability of vegetable oil–ethanol emulsions. *Journal of Oil & Fat Industries*. 78. 1185-1190. 10.1007/s11745-001-0411-z.
6. Lesnoybalzam: [Website]. URL: https://www.lesnoybalzam.ru/dentists_advice/sila-kory-duba?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 03.06.2025).
7. Vinatoru M., Mason T.J., Calinescu I. (2017) Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *Trends in Analytical Chemistry*, p. 159- 178.
8. Chung-Hung C., Jian-Jiun L., Yusoff L., GekCheng R., Gek-Cheng N. A (2015) Generalized EnergyBased Kinetic Model for Microwave-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Plants. *Separation and Purification Technology* (143), 152-160.
9. Burdo O. H., Bandura V. M., Ruzhytska N. V., Makiievska T. L. (2012) Enerhetychni aspekty kharchovykh nanotekhnolohii [Energy Aspects of Food Nanotechnologies] *Scientific Works*, 42 (2), 462-467.
10. Akimov, O., & Mordynskyi, V. (2022). Doslidzhennia protsesu ekstrahuvannya derevyny dubu v aparatakh elektrdynamichnoho typu [Research on the process of oak wood extraction in electrodynamic type apparatuses.] *Scientific Works*, 86(1), 100 - 105. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2410>
11. Kapetula, S. M. (2012). Kinytyka ekstrahuvannya olii iz nasinnia amarantu v mikrokhvyli'ovomu poli [Kinetics of oil extraction from amaranth seeds in a microwave field] [Ph.D. dissertation]. Odesa National Academy of Food Technologies.
12. Burdo O.H., Terziiev S.H., Shvedov V.V., Ruzhytska N.V. (2010) Protsesy pererobky shlamu v tekhnolohiiakh vyrobnytstva rozchynnoi kavy [Sludge Processing in Instant Coffee Production Technologies]. *Scientific Works*, 37, 252-255.

Отримано в редакцію 04.11.2024

Прийнято до друку 29.11.2024

Received 04.11.2024

Approved 29.11.2024