

УДК 66.061.3:66.023.5:547.263:665.347
DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v89i1.3264>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ОЛІЇ СОНЯШНИКА ВОДНИМИ РОЗЧИНАМИ ЕТАНОЛУ

Запорожець Д.О., аспірант, Ружицька Н.В., к.т.н., асистент
Одеський національний технологічний університет

Анотація. Україна є світовим лідером із виробництва соняшникової олії, проте під час переробки насіння після другого пресування в макусі залишається до 16 % залишкової олії. Вилучення олії переважно здійснюється вуглеводневими екстрагентами – продуктами переробки нафти, зокрема гексаном — вибухо-небезпечним і токсичним розчинником.

В якості екологічно безпечної альтернативи запропоновано етанол. Причому, замість абсолютного етанолу, технології використання якого описано в літературних джерелах, пропонується використовувати більш доступні водно-спиртові розчини з вмістом етанолу 80...96 %. Етанол є відновлюваним екстрагентом. Процес екстрагування пропонується електродинамічною дією, що активує механодифузійний механізм масопереносу.

Розроблено математичну модель процесу екстрагування, яка пов'язує ефективний коефіцієнт масовіддачі з параметрами сировини, властивостями екстрагенту та енергетичними режимами.

Проведені на електродинамічному екстракторі експерименти показали, що збільшення гідромодулю до 1:10 суттєво збільшує вихід олії. Розчини етанолу концентрацією 90 % здатні вилучити до 90% олії, яка міститься у макусі. Досліджено вплив питомого енергопідведення на вихід олії. Підтверджено ефект механодифузії та часткового емульгування, що дозволило отримати вміст олії в екстракті, який у 1,6 рази перевищує граничну розчинність.

Запропонована технологія дає змогу інтенсифікувати процес екстрагування, замінити екологічно небезпечні, або дорогі екстрагенти відновлюваним етанолом, зменшити енергосмість виробництва.

Ключові слова: макуха соняшника, електродинамічний екстрактор, мікрохвильове поле, тепломасообмін, екстрагування, механодифузія, етанол.

Вступ. Україна є одним з провідних виробників та експортерів соняшникової олії у світовому масштабі [1]. Після другого пресування у відходах олійного виробництва – макусі залишається близько 16 % олії, яку можна додатково вилучити [2]. Існуючі технології екстрагування передбачають використання вуглеводневих екстрагентів, таких, як екстракційні бензини та гексан, які ефективно розчиняють олію, проте є пожежотехнічно небезпечними, виробляються з нафтопродуктів, а, отже, відносяться до невідновлюваних ресурсів [3]. Крім того, в багатьох країнах використання гексану визнано небезпечним для здоров'я споживача. А, оскільки шрот в подальшому використовується в якості білкової кормової добавки, сліди гексану знижують його екологічну безпечність [4].

Формулювання проблеми. В якості альтернативи вуглеводневим екстрагентам пропонують надкритичні рідини та абсолютний етанол. Розчинність олії в надкритичному CO₂ невисока, а процес потребує високого тиску [5]. Абсолютний етанол вимогливий до умов зберігання, відпрацьований екстрагент після дистиляції потребує додаткового зневоднення [3]. Таким чином, зацікавленість викликає можливість використання в якості екстрагенту 96% етанолу, а також водо-спиртових розчинів з нижчим вмістом етанолу.

Оскільки розчинність олії в етанолі низька, традиційні технології екстрагування етанолом концентрацією 96% і менше вважають неефективними [3]. Для інтенсифікації процесу екстрагування пропонується задіяти механізм механодифузії, який ініціюється мікрохвильовим полем [6]. Даний метод показав високу ефективність в процесах екстрагування олії амаранту, збагаченої скваленом [7], олії ріпаку, сої [8], кави [9].

Викладення основного матеріалу. При моделюванні процесу враховувався вплив таких чинників, як розмір частинок d , густина ρ та в'язкість μ екстрагенту, коефіцієнт дифузії D . Різниця концентрацій ΔC , та гравітаційне поле g визначають внесок природної конвекції. Дія механодифузії визначається потужністю мікрохвильового інтенсифікатора N , питомою теплоотою пароутворення екстрагенту r . Також враховуються витрати продукту (G_{np}) та розчинника ($G_{роз}$), концентрація етанолу в екстрагенті ($X_{ет}$). Інтенсивність процесу екстрагування характеризує ефективний коефіцієнт масовіддачі, як функція зазначених вище параметрів:

$$\beta_{эф} = f(d, \rho, \mu, D, r, \Delta C, N, G_{np}, G_{роз}, g, X_{ет}). \quad (1)$$

Методом аналізу розмірностей одержано загальний вигляд критеріального рівняння:

$$Sh = A \cdot Sc^n \cdot Bu^m \Gamma^k E^l \quad (2)$$

Де Γ – гідромодуль, E – безрозмірний комплекс, який враховує розчинність етанолу в екстрагенті.

Об’єкти досліджень та обладнання. Досліди проводились на експериментальному об’ємному електродинамічному екстракторі періодичної дії, розробленому на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту, та лабораторній водяній бані ВБ-2. Для обробки експериментальних зразків використовувались сушильна шафа 2В-151, ваги аналітичні Radwag - 220, центрифуга ЦЛС-3.

Розчинність олії в розчинах етанолу визначали експериментально для температури кипіння етанолу.

В результаті апроксимації даних, отримано залежність для розрахунку розчинності олії в розчинах етанолу в залежності від концентрації етанолу (рис. 1).

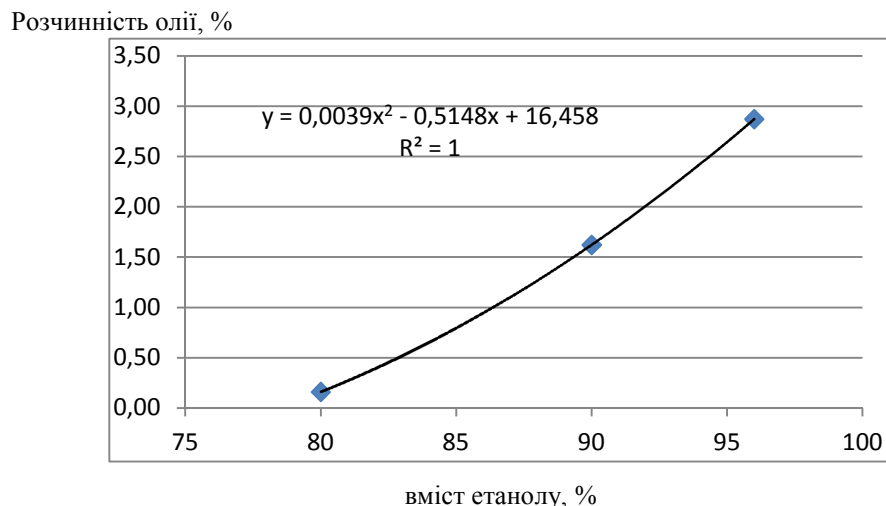
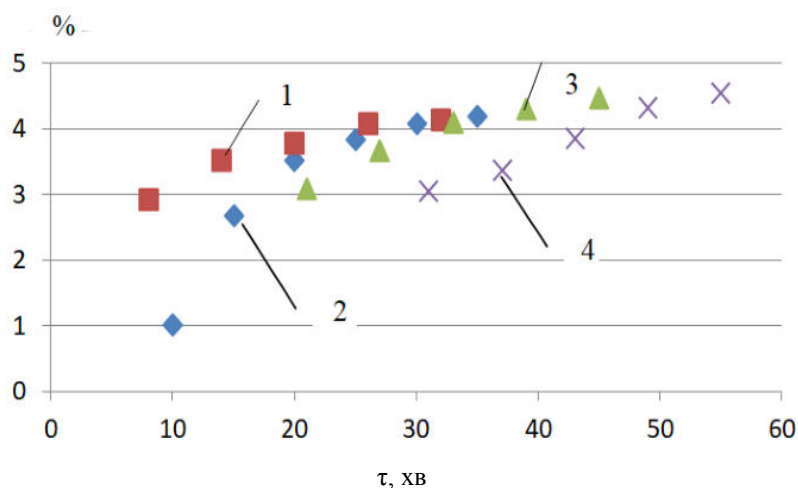


Рис. 1 – Графік розчинності соняшникової олії у водно-спиртових розчинах в залежності від концентрації етанолу за температури кипіння

В результаті обробки експериментальних даних, отримано залежність для розрахунку розчинності олії в розчинах етанолу (2) за температури кипіння етанолу:

$$X_{ol} = 0,0039 \cdot X_{C_2H_5OH} - 0,5148 \cdot X_{C_2H_5OH} + 16,458 \quad (2)$$

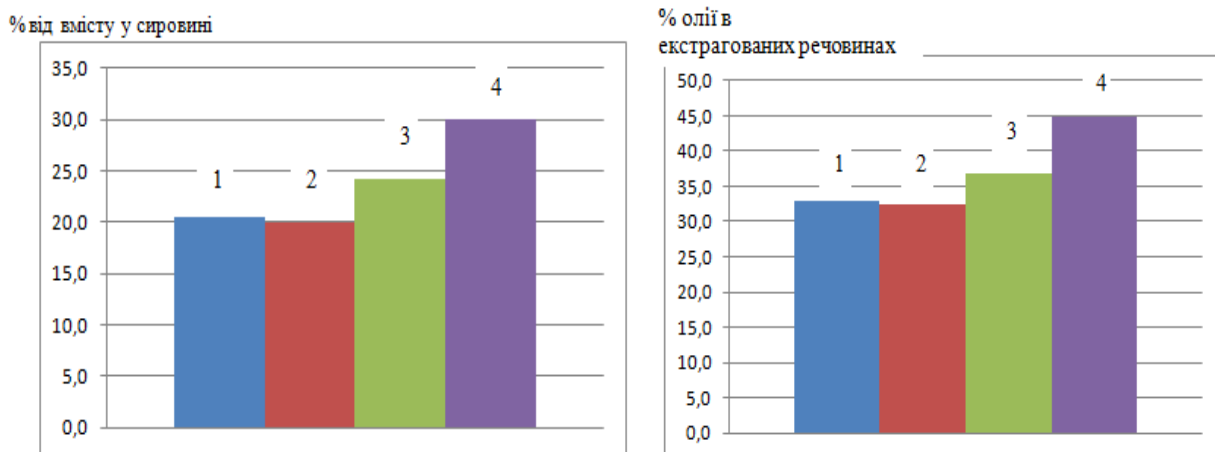
Вплив питомого підведення енергії на кінетику екстрагування та вихід олії. Для визначення впливу питомого енергопідведення досліджувалась кінетика вилучення сухих речовин та вихід олії. Питоме енергопідведення визначалось як відношення кількості підведеної енергії до маси сировини та екстрагенту, завантаженої у камеру. Досліди проводились з використанням етанолу концентрацією 90 % в режимі кипіння за атмосферного тиску. Результати досліджень наведено на рис. 2.



1 – МХ-кипіння, 3,74 МДж/кг; 2 - МХ-кипіння, 2,39 МДж/кг; 3 - МХ-кипіння, 1,42 МДж/кг; 4 – 750 кДж/кг

Рис. 2 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від питомого енергопідведення

Вихід олії визначався після розділення екстракту на фракції. На рис. 3 показано, що за менших питомих енерговитрат вихід олії збільшився, проте збільшилась і тривалість виходу процесу на стаціонарний режим, а, отже, і загальна тривалість обробки.

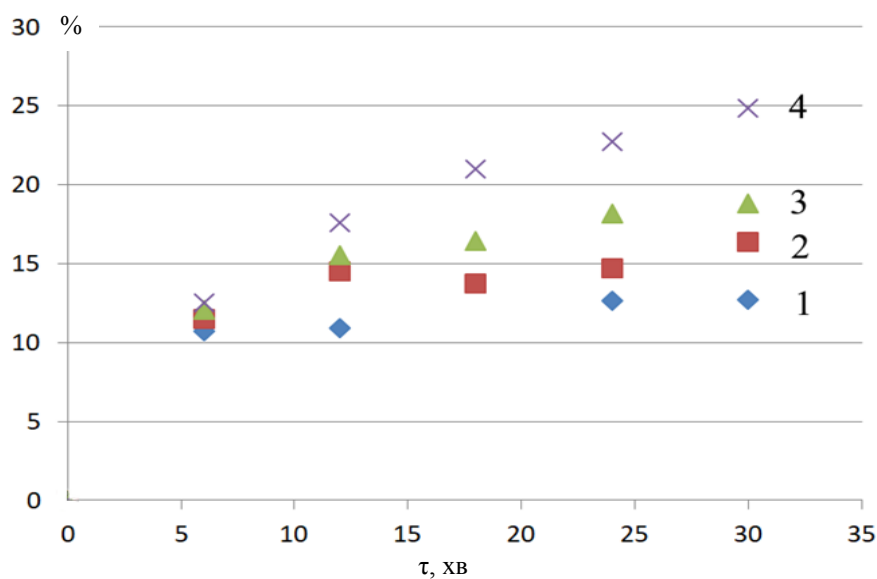


1 – 3742 кДж/кг; 2 – 2393 кДж; 3 – 1422 кДж/кг; 4 – 750 кДж/кг

Рис. 3 – Вихід олії в залежності від питомого підведення енергії

Зі зменшенням питомих енерговитрат збільшується й частка олії в екстрагованій речовині. Таким чином, екстрагування за високих потужностей мікрохвильового поля не є доцільним.

Вплив гідромодуля на кінетику екстрагування та вихід олії. Збільшення гідромодуля збільшує різницю концентрацій екстрактивних речовин у сировині та твердій фазі, проте зростають і витрати екстрагенту, який в подальшому необхідно вилучити з місцели. У випадку місцели олії в етанолі, основну частину екстрагенту можна відокремити охолодженням та відстоюванням, що суттєво знижує енерговитратність технології. Досліджувались гідромодулі 1:3, 1:5, 1:10, 1:20. Кінетичні криві будувались за відсотком маси твердої фази, що перейшов до екстракту, оскільки за різних гідромодулів порівняння концентрації екстрактивних речовин в екстракті неінформативне. Результати досліджень наведено на рис. 4.

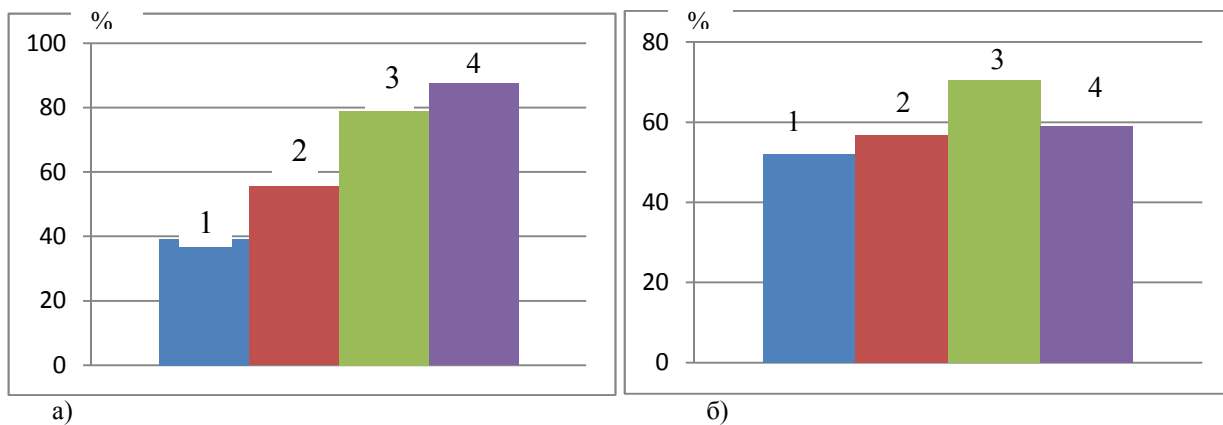


1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10; 4 – 1:20

Рис. 4 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від гідромодуля (за виснаженням твердої фази)

Очевидно, що зі збільшенням гідромодуля, інтенсивність масовіддачі збільшується. Найбільша а інтенсивність спостерігалась при гідромодулі 1:20.

Оцінювався вихід олії відносно вмісту олії в сировині, та частка олії в екстрактивних речовинах.



1 – 1:3; 2 – 1:5; 3 – 1:10; 4 – 1:20

Рис. 5 – Вихід олії в залежності від гідромодуля: а) відносно вмісту олії в сировині; б) частка олії в екстрактивних речовинах

Збільшення гідромодуля до 1:10 суттєво збільшує вихід олії (до 80%), також, за цього гідромодуля найбільша частка олії в екстрагованих речовинах. Це може бути пов'язане з різницею в розчинності всіх компонентів суміші, оскільки спирторозчинна фракція з соняшника відрізняється складним хімічним складом. Для подальших досліджень перевагу надано гідромодулю 1:10.

Вплив концентрації етанолу в екстрагенті на кінетику екстрагування та вихід олії. Враховуючи наявність механізму емульгування олії в етанолі в процесі екстрагування з макухи, було досліджено вплив вмісту етанолу в екстрагенті. Досліди проводились з 96%, 90% та 80% етанолом. Гідромодуль було обрано 1:10. Кінетичні криві процесу за концентрацією сухих речовин у екстракті наведено на рис. 6.

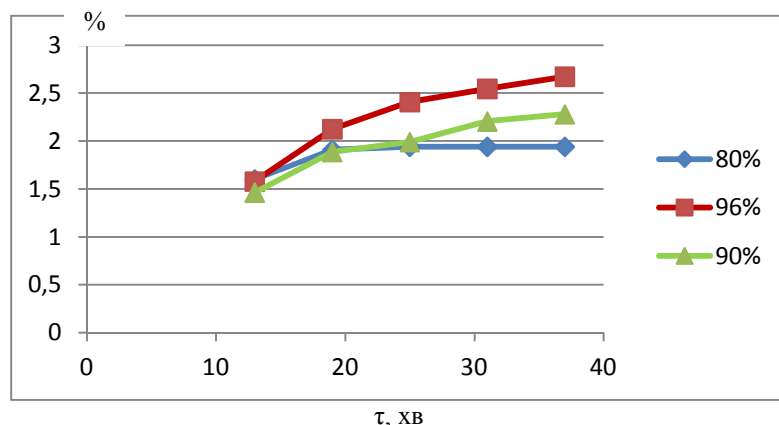
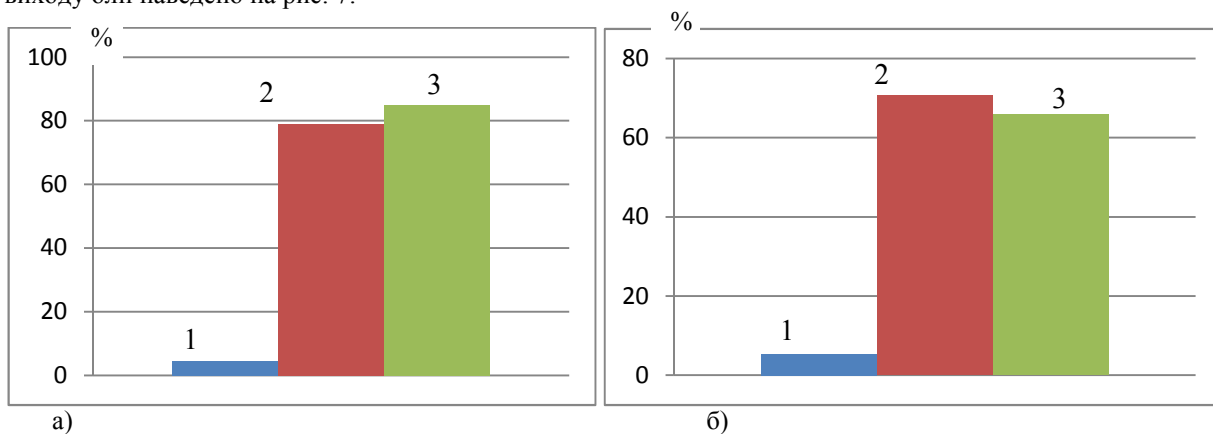


Рис. 6 – Кінетика вилучення сухих речовин в залежності від вмісту етанолу в екстрагенті

Графіки на рис. 6 показують загальний вихід екстрактивних речовин і не враховують вміст олії у екстракті, а різниця у виході сухих речовин при 96% та при 80% етанолу в екстрагенті складала 0,5%. Порівняння виходу олії наведено на рис. 7.

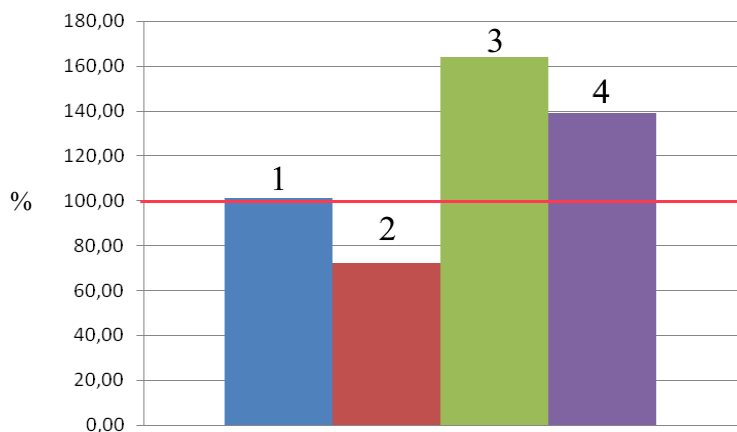


1 – 80%; 2 – 90%; 3 – 96%

Рис. 7 – Вихід олії в залежності від вмісту етанолу в екстрагенті: а) відносно вмісту олії в сировині; б) частка олії в екстрактивних речовинах

Вихід олії при екстрагуванні 80% етанолом незначний: близько 5% від всієї олії, та також близько 5% в екстрактивних речовинах. Найбільший вихід олії спостерігався при екстрагуванні 96% етанолом, а найбільший відсоток олії в екстрактивних речовинах – при 90%. Таким чином, використання 90% для екстрагування олії з макухи соняшника можливе.

Порівняння виходу олії з макухи з розчинністю олії в розчинах етанолу. Для підтвердження механізму емульгування внаслідок механо дифузії, порівняно вміст олії в одержаних екстрактах з розчинністю олії у відповідних екстрагентах. Розчинність взята за 100%. Результати наведено на рис. 8.



1 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:3, 2-3 мм, 1422 кДж/кг; 2 – традиційне нагрівання, гідромодуль 1:3, 2...3 мм, 1422 кДж/кг; 3 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:3, 0,2...0,8 мм, 2,39 МДж/кг; 4 – електродинамічний екстрактор, гідромодуль 1:5, 0,2...0,8 мм, 2,39 МДж/кг

Рис. 8 – Вміст олії в екстракті в порівнянні з розчинністю

Як видно з рис. 8 вміст олії в екстракті за деяких режимів перевищує розчинність у 1,6 рази, а за однакових умов, при традиційному нагріванні вміст олії в екстракті складає близько 70% від розчинності, в той час, як в електродинамічному – 101%. Таким чином, підтверджується часткове емульгування олії під час екстрагування етанолом, а збільшення виходу олії пов'язується з явищем механо дифузії.

Висновки. Встановлено, що використання 96% і 90% етанолу як екстрагенту можливе для вилучення олії з соняшникової макухи. Показано, що мікрохвильове поле ініціюючи механо дифузію інтенсифікує часткове емульгування, внаслідок чого вміст олії в екстракті може перевищувати її розчинність у 1,6 рази.

Найбільший вихід олії спостерігається за значень гідромодулю 1:10 та 1:20. Екстрагуванням 90%-м етанолом вдалось вилучити до 90% олії, що містилась у сировині. Використання розчинів концентрацією 80% є недоцільним через низький вихід олії. Підвищення питомого підведення енергії прискорює перехід суміші в екстракторі у стаціонарний режим кипіння, але збільшує енерговитрати, та не збільшує вихід олії, тому потужності МХ-нагріву більші за 1422 кДж/кг є недоцільними.

References

- Shevchenko, A., Petrenko, O., & Helas, V. (2024). *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>
- Shemanska, Ye. I., & Radzievska, I. H. (2020). *Tekhnologii roslinnykh olii, zhyrovyykh i kosmetychnykh produktiv* [Technologies of vegetable oils, fats and cosmetic products]. Vyscha shkola. (in Ukrainian)
- Petik, P. F., Hirman, V. V., Papchenko, V. Yu., et al. (2018). *Innovatsiini tekhnologii kompleksnoi pererobky nasinnia soniashnyku* [Innovative technologies of complex sunflower seed processing]. Agrarna nauka. (in Ukrainian)
- Raimundo, K., Silva, T., Silva, A., & Sakai, O. (2020). Efficiency of ethanol and hexane extraction of sunflower oil from seeds of plants inoculated with *Azospirillum brasilense* and fertilized with sewage sludge. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 5. <https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2020vol5n71323>
- Kulazynski, M., Stolarski, M., Faltynowicz, H., et al. (2016). Supercritical fluid extraction of vegetable materials. *Chemistry & Chemical Technology*, 10(4s), 637–643
- 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 (IJERA)*, 6(3), 144–150.
- Buivol, S. M., Svitlychnyi, P. I., & Malashevych, S. A. (2011). *Intensyfikatsiia ekstrahuvannia olii v elektromahnitnomu poli* [Intensification of oil extraction in an electromagnetic field]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 39, 163–166. (in Ukrainian)
- Bandura, V. M., & Kolianovska, L. M. (2011). *Intensyfikatsiia ekstrahuvannia roslinnykh olii elektromahnitnym polem* [Intensification of vegetable oil extraction by electromagnetic field]. *Naukovi pratsi ONAKhT*, 39, 186–190. (in Ukrainian)

9. Ruzhytska, N. V. (2013). *Kinetics of drying and extraction processes during coffee sludge utilization* (Doctoral dissertation). Odesa National Academy of Food Technologies. (in Ukrainian)

EXPERIMENTAL AND MATHEMATICAL MODELING OF SUNFLOWER OIL EXTRACTION PROCESSES USING WATER-ETHANOL SOLUTIONS

Zaporozhets D.O., graduate student, Ruzhytska N.V., PhD
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. Ukraine is a world leader in sunflower oil production. However, during the processing of seeds, up to 16 % of residual oil remains in the oil cake after the second pressing. Oil extraction is predominantly carried out using hydrocarbon extractants – products of oil refining, particularly hexane – which is an explosive and toxic solvent.

As an environmentally safe alternative, ethanol has been proposed. Moreover, instead of absolute ethanol, the technology for the use of which is described in the literature, it is suggested to use more readily available water-alcohol solutions with an ethanol content of 80 % - 96 %. Ethanol is a renewable extractant. The extraction process is proposed to be activated by an electrodynamic effect, which activates the mechanodiffusion mechanism of mass transfer.

A mathematical model of the extraction process has been developed. It relates the effective mass transfer coefficient to the raw material parameters, the properties of the extractant, and the energetic regimes.

Experiments conducted on an electrodynamic extractor showed that increasing the hydromodulus (solvent-to-solid ratio) up to 1:10 significantly increases the oil yield. Ethanol solutions with a concentration of 90 % are capable of extracting up to 90 % of the oil contained in the oil cake. The influence of specific energy input on the oil yield was investigated. The effect of mechanodiffusion and partial emulsification was confirmed, which allowed for an oil content in the extract that exceeds the ultimate solubility by 1,6 times.

The proposed technology makes it possible to intensify the extraction process, replace environmentally hazardous or expensive extractants with renewable ethanol, and reduce the energy consumption of production.

Keywords: sunflower oil cake, electrodynamic extractor, microwave field, heat and mass transfer, extraction, mechanodiffusion, ethanol

Список використаної літератури

1. Шевченко А., Петренко О., Гелас В. Стратегічний розвиток вирощування соняшнику в Україні // *Економічний вісник Причорномор'я*. – 2024. – № 5. – С. 133–145.
2. Шеманська Є. І., Радзівська І. Г. Технології рослинних олій, жиркових і косметичних продуктів. – Київ : Вища школа, 2020. – 182 с.
3. 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.
4. Raimundo K., Silva T., Silva A., Sakai O. Efficiency of ethanol and hexane extraction of sunflower oil from seeds of plants inoculated with *Azospirillum brasilense* and fertilized with sewage sludge // *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. – 2020. – Vol. 5. – DOI: 10.21575/25254782rmetg2020vol5n71323.
5. Kulazynski M., Stolarski M., Faltynowicz H. [та ін.] Supercritical fluid extraction of vegetable materials // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2016. – Vol. 10, № 4(s). – С. 637–643.
6. The Nanotechnological Innovation in Food Industry [Text] / O.G. Burdo, A. V. Zikov, S. G. Terziev, N.V. Ruzhitskaya // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* – 2016 - Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150
7. Буйвол С. М., Світличний П. І., Малашевич С. А. Інтенсифікація екстрагування олії в електромагнітному полі // *Наукові праці ОНАХТ*. – Одеса, 2011. – Вип. 39. – С. 163–166.
8. Бандура В. М., Коляновська Л. М. Інтенсифікація екстрагування рослинних олій електромагнітним полем // *Наукові праці ОНАХТ*. – Одеса, 2011. – Вип. 39. – С. 186–190.
9. Ружицька Н. В. Кінетика процесів сушіння та екстрагування при утилізації шламу кави : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Одес. нац. акад. харч. технологій. – Одеса, 2013. – 137 с.

Отримано в редакцію 06.07.2025

Received 06.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Approved 02.09.2025