

ІНЖЕНЕРНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЕКСТРАКТОРІВ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО ТИПУ

Молчанов М.Ю. аспірант, Коцур І.О. аспірант, Терзієв С.Г. д.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

Анотація. У сучасному виробництві спостерігається тенденція до розширення використання концентратів рослинної сировини, які, попри складність виготовлення, характеризуються зручністю зберігання, високою концентрацією біологічно активних речовин і тривалим терміном придатності. Разом із тим, традиційні технології екстрагування залишаються енергоємними та екологічно неефективними через застосування застарілого обладнання. Це зумовлює необхідність удосконалення технологічних процесів та впровадження нових методів обробки сировини, спрямованих на підвищення виходу екстрактивних речовин і зменшення енергетичних витрат.

Перспективним напрямом є використання мікрохвильового (МХ) поля для інтенсифікації процесів екстрагування. Такий підхід дає змогу дослідити кінетику масообміну, ефект механодифузії та можливість екстрагування без попереднього подрібнення сировини.

Проведено аналіз робіт, присвячених МХ-екстрагуванню кавової сировини з використанням води, етанолу та CO_2 . Встановлено перспективність методу для підвищення ефективності вилучення екстрактивних речовин.

Ключові слова: екстрагування, мікрохвильове поле, експериментальне моделювання, тепломасообмін.

Вступ. Концентрати, отримані з рослинної сировини, вирізняються швидкістю підготовки до використання, тривалим терміном зберігання, зручністю транспортування та універсальністю застосування у різних галузях промисловості. Сукупність цих характеристик визначає зростання попиту на рослинні концентрати (РК) як у хімічній та фармацевтичній промисловості, так і в харчовому секторі, де вони використовуються у вигляді харчових концентратів (ХК) [1]. Останніми роками спостерігається стабільне розширення асортименту РК і збільшення масштабів їх виробництва. Продукція даного типу активно застосовується не лише на промислових підприємствах, але й у сфері громадського харчування та побуті — для приготування страв, десертів і напоїв [2].

У харчовій промисловості найбільш розповсюдженим продуктом цього напрямку є порошок розчинної кави, а також набувають популярності рідкі кавові концентрати [3]. Кавова галузь залучає понад 25 млн працівників у світі, що свідчить про її значну соціально-економічну роль. Продажі розчинної кави стабільно зростають, а ринок рослинних концентратів демонструє позитивну динаміку, зумовлену підвищенням інтересу споживачів до натуральних інгредієнтів. Згідно з прогнозами, у 2022–2030 роках очікується середньорічне зростання ринку рослинних екстрактів на рівні близько 7 % [4]. Такі тенденції пояснюються підвищенням рівня обізнаності щодо користі натуральних продуктів, зростанням поширеності хронічних захворювань і розвитком профілактичної медицини. Додатковими чинниками є підвищений попит на рослинні екстракти у виробництві харчових продуктів, напоїв, косметики та нутрицевтиків.

Ключовими стадіями технологічного процесу отримання РК є екстрагування та сушіння, які характеризуються високими енергетичними витратами та екологічними ризиками [5, 6]. Оскільки собівартість сировини є фактором, що практично не підлягає регулюванню з боку виробника, підвищення конкурентоспроможності можливе у двох напрямках: впровадження інноваційних технологій для інтенсифікації процесів екстрагування та сушіння або ж використання технологій глибокої переробки, спрямованих на максимальне вилучення цільових компонентів із сировини при мінімальному впливі на довкілля.

На кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту Одеського національного технологічного університету розроблено інноваційні технологічні рішення, що базуються на використанні мікрохвильового (МХ) поля для цілеспрямованого підведення енергії до структурних елементів сировини — клітин, пор та частинок. Такий підхід забезпечує підвищення енергоефективності процесів, покращення якісних показників готової продукції та розширення асортименту виробів. Але обробка МХ полем можлива лише в спеціальних апаратах електродинамічного типу в яких поле буде діяти лише на сировину не екрановану екстрагентом, тому для цього обрано електродинамічні екстрактори циркуляційного типу що дозволяють обробляти сировину циркулюючим екстрагентом в певні періоди часу. Через складність конструкції такого апарату і ускладнення процесу в ньому за рахунок утворення нового ефекту, що впливає на процес, ускладняється і розрахунок таких апаратів. Тому ставиться завдання привести приклад інженерного методу розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу.

Аналіз літературних джерел та формулювання проблеми. У публікації [7] наведено результати дослідження процесу мікрохвильового (МХ) екстрагування олії із зелених кавових зерен. Встановлено, що ви-

користання МХ-енергії дає змогу скоротити тривалість екстрагування до 10 хв при температурі 45 °С, тоді як традиційний метод у апараті Сокслета потребує близько чотирьох годин. Отримані екстракти характеризуються високою антиоксидантною активністю. Водночас залишаються відкритими питання, пов'язані з можливістю ефективного вилучення кавової олії з кавового шламу. Ймовірно, це обумовлено нижчим вмістом олії у відходах порівняно з меленими зернами. Проте згідно з експериментальними даними, у кавовому шламі міститься 7–12 % олії, а залишкові компоненти мають повноцінний хімічний склад, подібний до вихідної сировини. Таким чином, кавовий шлам може розглядатися як перспективна вторинна сировина для одержання кавової олії, що потенційно дає змогу знизити собівартість кінцевого продукту.

У роботі [8] представлено результати МХ-екстрагування відпрацьованої фільтрованої кави, яка утворюється як побічний продукт у закладах громадського харчування та побутових умовах. Як екстрагент застосовували 20 %-й розчин етанолу, у результаті чого отримано поліфенольні екстракти з вираженими антиоксидантними властивостями.

У працях [9, 10] розглянуто альтернативні методи вилучення біоактивних речовин із кавової сировини — зокрема, рідинне екстрагування під тиском олії із зелених кавових зерен при 50 °С, а також МХ-екстрагування олії з кавового шламу із застосуванням суміші CO₂ та етанолу. Зазначено, що використання цих методів забезпечує підвищений вихід екстрактивних речовин, скорочення тривалості процесу та зменшення обсягу використаних органічних розчинників.

У роботі [11] досліджено процес МХ-екстрагування полісахаридів із кавового шламу. Експерименти проводили за умов підвищених температур (140–200 °С) та тиску (до 4 МПа). Водночас встановлено, що застосування високих тисків, особливо у випадку надкритичного екстрагування CO₂, суттєво підвищує енергоспоживання процесу. Крім того, такі технології характеризуються складною апаратурною реалізацією, що обмежує їх промислове застосування.

Інженерна методика розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. Розрахунок екстрактора електродинамічного типу є відмінним від традиційного тим що процес у ньому йде не лише за рахунок хімічної взаємодії розчинних цільових компонентів сировини і розчинника, а й за рахунок механічного видалення слабозрчинних і нерозчинних компонентів під дією ефекту механодифузії. Тому при розрахунку потрібно враховувати потужність і вплив електромагнітного поля на сировину.

Для подальших розрахунків базовими незмінними параметрами виступають початкові характеристики сировини та екстрагента і продуктивність екстрактора. До основних параметрів належать: вміст екстрактивних речовин у сировині, що можуть переходити в екстрагент, їх концентрація в отриманому екстракті, початкова температура екстрагента. Змінними параметрами є теплофізичні характеристики екстрагента, гідромодуль, потужність електромагнітного поля, конструктивні особливості апарата, температура в процесі обробки та кінцева концентрація екстракту.

Крім зазначених змінних і незмінних параметрів, на процес обробки впливають додаткові чинники: термодинамічні, гідродинамічні, кінетичні, масообмінні та технологічні.

Розрахунок дозволяє визначити кінцеві концентрації цільових компонентів у сировині та екстрагенті, необхідну потужність електромагнітного поля в заданому температурному діапазоні, коефіцієнт масовіддачі β , а також енергетичні витрати на процес обробки. Алгоритм розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу приведено на рис. 1.



Рис. 1 – Алгоритм розрахунку електродинамічного екстрактора циркуляційного типу

Основними теплофізичними параметрами екстрагенту які нас цікавлять є його щільність ρ , кг/м³, питома теплоємність Дж/(кг*К) та прихована теплота пароутворення Дж/кг, ці параметри визначаються за спрощеними формулами приведеними у БС-ТФВ (рис. 2.)

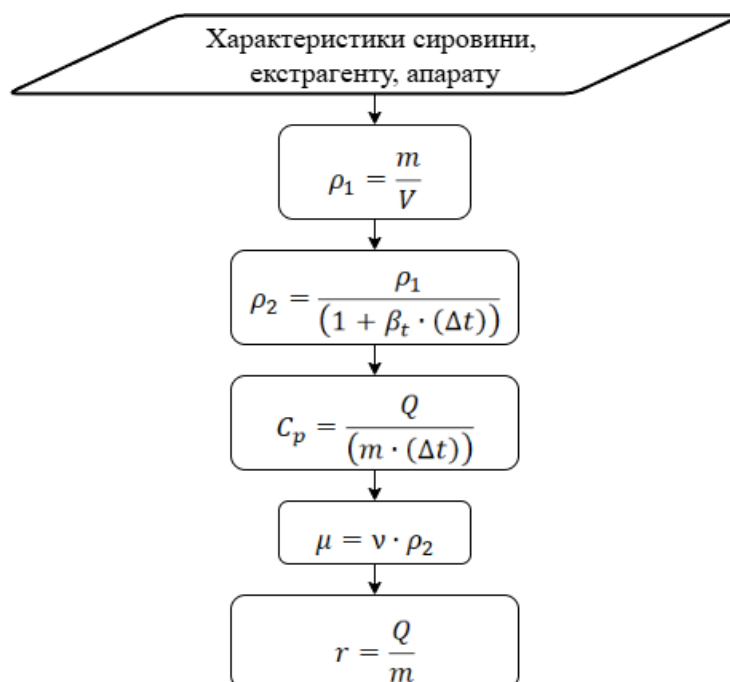


Рис. 2 – Блок-схема визначення теплофізичних властивостей (БС-ТФВ)

Де: ρ_1 – густина при певній температурі, кг/м³, може бути обрана за таблицею; m – маса рідини, кг; V – об'єм рідини, м³; ρ_2 – густина з урахуванням впливу температури, кг/м³; β_t – коефіцієнт температурного розширення рідини, К⁻¹, може бути обрано за таблицею; Δt – різниця температур початкової та кінцевої, °С; c_p – питома теплоємність, Дж/(кг/К), може бути обрано за таблицею; Q – кількість енергії для нагріву сировини на певну температуру, Дж; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па*с, може бути обрано за таблицею; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с, може бути обраний за таблицею; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг, може бути обрано за таблицею.

Для визначення концентрації екстрактивних речовин у сировині можна використати БС-КМП (рис. 3), з використанням відомих густин сировини та екстрагенту, їх витрати та максимально допустимої кількості екстрактивних речовин які можна витягнути з сировини.

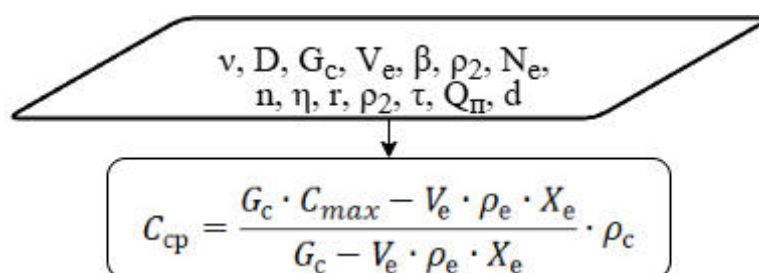


Рис. 3 – Блок-схема визначення поточної концентрації в твердій фазі (БС-ПК)

Де: C_{cp} – поточна концентрація цільових компонентів в сировині; G_c – маса сировини, кг; C_{max} – максимальна концентрація цільових компонентів в сировині; V_e – об'єм екстрагенту, м³; ρ_e – густина екстрагенту, кг/м³; ρ_c – густина сировини, кг/м³; X_e – концентрація цільових компонентів в екстрагенті.

Наступним йде визначення кінетики масопереносу, ціль розрахунку цього параметру це отримання ефективного коефіцієнту масовіддачі β_{ef} . Для розрахунку β_{ef} потрібно врахувати число Sc – зміна властивостей потоку, Γ – гідромодуль, співвідношення сировини та екстрагента, число Bu – число енергетичної дії МХ поля. Коефіцієнт масовіддачі визначається з числа Шервуда (Sh), яке буде в основі розрахунку. Рівняння визначення поточної концентрації приведено в БС-ПК (рис. 3.).

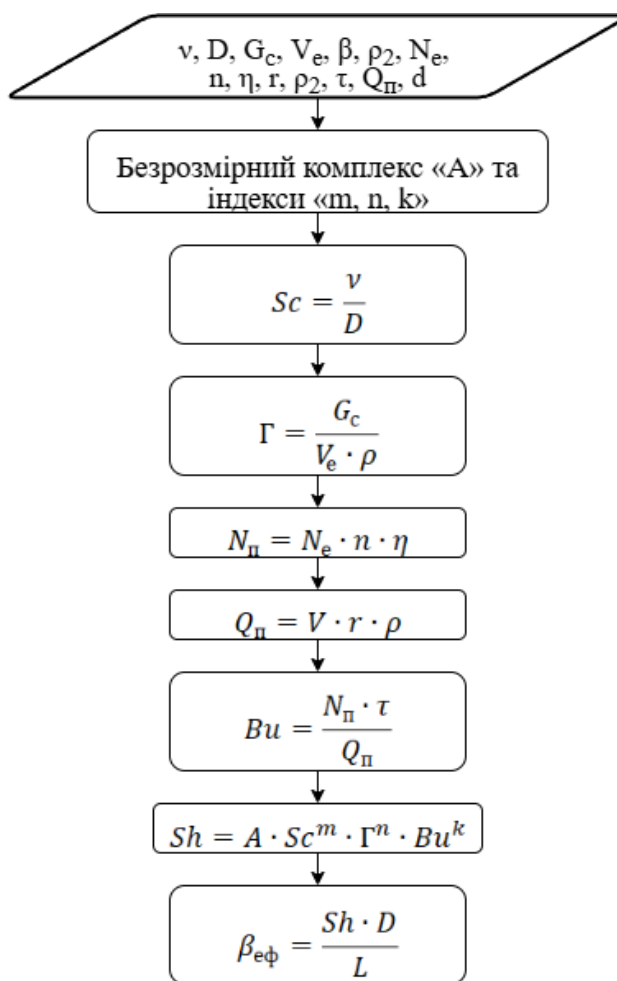


Рис. 4 – Блок-схема визначення кінетики масопереносу (БС-КМП)

Де: D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$, визначається експериментально; Γ – гідромодуль, співвідношення сировини та екстрагенту; G_c – витрата сировини, $\text{кг}/\text{с}$; V_e – витрата екстрагенту, $\text{м}^3/\text{с}$; N_n – потужність що споживається продуктом, Вт ; N_e – потужність що споживається магнетроном; n – коефіцієнт робочого часу магнетрону; η – ККД роботи магнетрона. Q_n – енергія витрачена на нагрів сировини, Дж ; V – об'єм сировини, м^3 ; τ – час обробки, с ; L – цільовий розмір, м . Величина «А» та індекси «m, n, k» визначаються графічно чи аналітично.

Для розрахунку використано наступні числа подоби: Sc – число Шмідта, яке є співвідношенням кількості руху потоку до дифузійного потоку; Bu – число Бурдо, яке є числом енергетичної дії магнетрона;

Sh – число Шервуда, яке є співвідношенням коефіцієнту конвективного масообміну до коефіцієнту дифузії.

Після визначення даних з приведених вище блок-схем стає можливим побудова загального алгоритму розрахунку параметрів електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. Метою розрахунку алгоритму на рис. 5. є отримання кількості екстрактивних речовин що перейшли до екстракту, енергетичні витрати на процес обробки та його час. Вхідними параметрами для розрахунку є: початкові параметри екстрагенту (його тип, витрати, початкова температура); характеристики сировини (загальна маса, площа поверхні 1 кг сировини, густина сировини); гідромодуль; енергетичні параметри апарату; коефіцієнт дифузії для обраної сировини та екстрагенту; початкова та цільова концентрація цільових компонентів; температури процесу. Потужність МХ поля що буде робочою визначається заданою температурою процесу обробки. У 6 блоці блок-схеми проводиться розрахунок поточної та середньої температури процесу, за якою визначаються теплофізичні властивості екстрагенту. У блоках 8 – 12 визначається поточні значення концентрації. У блоці 11 визначається маса цільових компонентів які перейшли з сировини до екстрагенту за певний проміжок часу обробки, за допомогою коефіцієнта масовіддачі, який визначається з критеріального рівняння на основі результатів досліджень окремо для певних комбінацій сировини, екстрагенту та апарату. Для визначення площі поверхні контакту фаз потрібно знати питому поверхню та масу сировини. Час обробки екстрактора визначається моментом, коли концентрація цільових компонентів у сировині досягає рівноважної концентрації і екстрагент не може розчинити більше екстрактивних речовин.

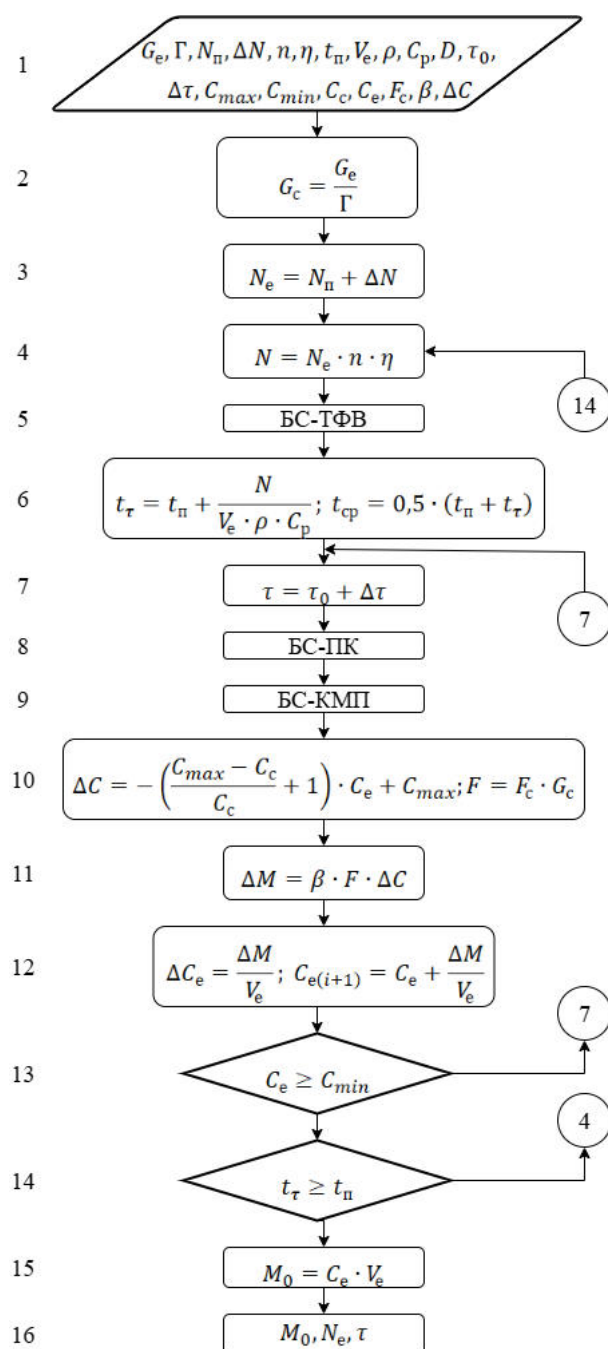


Рис. 5 – Загальний алгоритм розрахунку параметрів електродинамічного екстрактора циркуляційного типу

Де: G_c - маса сировини для обробки, кг; Γ – гідромодуль; t_τ - температура процесу обробки, °C; t_n - початкова температура сировини, °C; t_{cp} - середня температура обробки, °C; τ – час обробки сировини, с; τ_0 – час початку обробки сировини, с; $\Delta\tau$ – проміжок часу обробки, с; ΔC – різниця концентрацій між сировиною та екстрагентом; ΔC_{cp} – різниця поточних концентрацій сировини за проміжок часу обробки; ΔM – різниця маси екстрактивних речовин що перейшла до екстрагенту за проміжок часу обробки; M_0 - маса екстрактивних речовин у екстракті.

Екстрагент для обробки повинен мати нульову концентрацію цільових компонентів для збільшення масообмінних характеристик. Кількість циклів обробки сировини в циркуляційному екстракторі залежить від необхідної кінцевої концентрації екстракту.

Висновки. Розроблений алгоритм дозволяє здійснити інженерний розрахунок електродинамічного екстрактора циркуляційного типу. В основі розрахунку лежить принцип застосування аналітичних моделей з числами подібності. Результатом розрахунку є ефективний коефіцієнт масовіддачі, який дає змогу визначити кількість вилученого цільового компоненту з сировини за певний проміжок часу і необхідну для цього

потужність електромагнітного поля.

References

1. Ahangari, B., & Sargolzaei, J. (2012). Extraction of lipids from spent coffee grounds using organic solvents and supercritical carbon dioxide. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37(5), 1014–1021. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00757.x>
2. Belandria, V., Aparecida de Oliveira, P. M., Chartier, A., Rabi, J. A., de Oliveira, A. L., & Bostyn, S. (2016). Pressurized-fluid extraction of cafestol and kahweol diterpenes from green coffee. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.022>
3. Kim, J. H., Ahn, D. U., Eun, J. B., & Moon, S. H. (2016). Antioxidant effect of extracts from the coffee residue in raw and cooked meat. *Antioxidants*, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/antiox5030021>
4. Ozyurt, V. H., Çakaloglu, B., & Otles, S. (2021). Optimization of cold press and enzymatic-assisted aqueous oil extraction from tomato seed by response surface methodology: Effect on quality characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(5), e15471. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15471>
5. Ruckmangathan, S., Ganapathyswamy, H., Sundararajan, A., Thiagamoorthy, U., Green, R., & Subramani, T. (2022). Physico-chemical, structural, and functional properties of protein concentrate from selected pulses: A comparative study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022(202246). <https://doi.org/10.1111/jfpp.17169>
6. Samsalee, N., & Sothornvit, R. (2022). Different novel extraction techniques on chemical and functional properties of sugar extracts from spent coffee grounds. *Aims Agriculture and Food*, 7(4), 897–915. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2022055>
7. Todaro, A., Arena, E., Timpone, R., Parafati, L., Proetto, I., Pesce, F., Pisana, F., Fallico, B., & Palmeri, R. (2023). Use of concentrated fruit juice extracts to improve the antioxidant properties in a soft drink formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 31(6), 100649. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100649>
8. Tsukui, A., Santos Júnior, H. M., Oigman, S. S., de Souza, R. O. M. A., Bizzo, H. R., & Rezende, C. M. (2014). Microwave-assisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. *Food Chemistry*, 164, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>
9. Zia, S., Khan, M. R., Shabbir, M. A., Maan, A. A., Khan, M. K. I., Nadeem, M., Khalil, A. A., Din, A., & Aadil, R. M. (2020). An inclusive overview of advanced thermal and nonthermal extraction techniques for bioactive compounds in food and food-related matrices. *Food Reviews International*, 38(6), 1166–1196. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1772283>

ENGINEERING METHODS FOR CALCULATION OF ELECTRODYNAMIC EXTRACTORS OF CIRCULATION TYPE

Molchanov M.Yu. postgraduate student, Kotsur I.O. postgraduate student, Terziev S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. In modern production, there is a tendency to expand the use of plant raw material concentrates, which, despite the complexity of production, are characterized by ease of storage, high concentration of biologically active substances and long shelf life. At the same time, traditional extraction technologies remain energy-intensive and environmentally inefficient due to the use of outdated equipment. This necessitates the improvement of technological processes and the introduction of new methods of processing raw materials aimed at increasing the yield of extractive substances and reducing energy costs.

A promising direction is the use of a microwave (MX) field to intensify extraction processes. This approach makes it possible to study the kinetics of mass transfer, the effect of mechanodiffusion and the possibility of extraction without prior grinding of raw materials.

An analysis of works devoted to the MX extraction of coffee raw materials using water, ethanol and CO₂ was carried out. The prospects of the method for increasing the efficiency of extractive substances extraction were established. The calculation, based on the principle of using analytical models with similarity numbers (or dimensionless numbers) is proposed. The result of the calculation is the effective mass transfer coefficient, which makes it possible to determine the amount of the target component extracted from the raw material over a certain period of time and the electromagnetic field power required for this purpose.

Key words: extraction, microwave field, experimental modeling, heat and mass transfer.

Список використаної літератури

1. Ruckmangathan S., Ganapathyswamy H., Sundararajan A., Thiagamoorthy U., Green R., Subramani T. Physico-Chemical, Structural, and Functional Properties of Protein Concentrate From Selected Pulses: A

- Comparative Study. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 202246. <https://doi.org/10.1111/jfpp.17169>
2. Todaro A., Arena E., Timpone R., Parafati L., Proetto I., Pesce F., Pisana F., Fallico B., Palmeri R. Use of concentrated fruit juice extracts to improve the antioxidant properties in a soft drink formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2023, 31(6), 100649. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100649>
 3. Zia S., Khan M.R., Shabbir M.A., Aslam Maan A., Khan M.K.I., Nadeem M., Khalil A.A., Din A., Aadil R.M. An Inclusive Overview of Advanced Thermal and Nonthermal Extraction Techniques for Bioactive Compounds in Food and Food-related Matrices. *Food Reviews International*, 2020, 38(6), 1166–1196. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1772283>
 4. Ozyurt V.H., Çakaloglu B., Otles S. Optimization of cold press and enzymatic-assisted aqueous oil extraction from tomato seed by response surface methodology: Effect on quality characteristics. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(5), e15471. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15471>
 5. Tsukui A., Santos Júnior H.M., Oigman S.S., de Souza R.O.M.A., Bizzo H.R., Rezende C.M. Microwaveassisted extraction of green coffee oil and quantification of diterpenes by HPLC. *Food Chemistry*, 2014, 164, 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.039>
 6. Kim J.H., Ahn D.U., Eun J.B., Moon S.H. Antioxidant Effect of Extracts from the Coffee Residue in Raw and Cooked Meat. *ANTIOXIDANTS*, 2016, 5(3), 21. <https://doi.org/10.3390/antiox5030021>
 7. Belandria V., Aparecida de Oliveira P.M., Chartier A., Rabi J.A., de Oliveira A.L., Bostyn S. Pressurized-Fluid Extraction of Cafestol and Kahweol Diterpenes from Green Coffee. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 37, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.022>
 8. Ahangari B., Sargolzaei J. Extraction of Lipids from Spent Coffee Grounds Using Organic Solvents and Supercritical Carbon Dioxide. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2012, 37(5), 1014–1021. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00757.x>
 9. Samsalee N., Sothornvit R. Different Novel Extraction Techniques on Chemical and Functional Properties of Sugar Extracts from Spent Coffee Grounds. *Aims Agriculture and Food*, 2022, 7(4), 897–915. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2022055>

Отримано в редакцію 01.07.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 01.07.2025

Approved 02.09.2025