

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕКСТРАГУВАННЯ ЕФІРНИХ ОЛІЙ У МІКРОХВИЛЬОВОМУ ПОЛІ

Коваленко О.А., д.с.х.н., доцент², Славинський Р.Л., аспірант¹,
Федосов Я. С., аспірант², Славинська В.О., інженер¹,
Аль-Хамад І.М. ¹, аспірант

¹ Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

² Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

Анотація. Тенденції зростання світового ринку ефірних олій та попит на натуральні речовини є драйверами поширення використання ефірних олій в різноманітних галузях народного господарства. Існує багато методів отримання ефірних олій, у статті описані і порівняні традиційні та інноваційні методи, які уповільнюють ризик втрати основних термолабільних компонентів рослинної сировини, зберігають якість, зменшують час екстракції, діють екологічно безпечно та збільшують відсоток виходу ефірних олій. У зв'язку з тим, що традиційні методи отримання ефірних олій мають багато недоліків основний з яких — це термостабільність ефірних олій за високих температур існує необхідність у інноваційних методах, які зменшать вплив цих факторів.

В статті приведені експериментальні данні дослідів на різних зразках квітів лаванди та гісопу сорту «Маркіз». Проілюстрован експериментальний стенд для проведення екстракції ефірної олії з лаванди та гісопу за допомогою інноваційного методу — мікрохвильової дистиляції парою.

Цей процес є поєднанням традиційних технологій, а саме, парової дистиляції та інноваційної технології, мікрохвильового нагріву. Нагрівання мікрохвилями допомогло ініціювати та створити передачу маси та тепла в середині рослинних матриць назовні, що призвело до значного скорочення часу екстракції, за допомогою впливу механодифузії. На підставі аналізу методів та на основі експериментальних даних робимо висновок про те, що електродинамічні системи мають значні перспективи у широкому використанні. Тому, ставиться завдання залучити їх до процесів отримання екстрактів ефірних олій. Проведено дослідження кінетики екстракції та вплив гідромодуля на процес екстрагування. Визначено, що циклічне екстрагування вилучає більше цільових компонентів, ніж одноразове.

Вплив гідромодуля на інтенсивність масоперенесення характеризує науково-технічне протиріччя між факторами підвищення значення рушійної сили та концентрацією екстракту. Розглянуто вплив схеми обробки на інтенсивність масоперенесення на прикладі гісопу сорту «Маркіз». Отримані результати є базою для організації енергоефективних режимів екстрагування із квітів лаванди та гісопу.

Ключові слова: мікрохвильова парова дистиляція, добування ефірної олії з лаванди та ісопу, інноваційні методи

Вступ. Світовий ринок ефірних олій у 2020 році оцінювався майже в 11 млрд. доларів США, і, за прогнозами, до 2030 року він досягне майже 25 млрд. доларів США, а середньорічний темп зростання складе 8% з 2021 по 2030 рік [1]. Зростаючий попит на натуральні речовини в продуктах харчування та напоях, а також в індустрії парфумерії та засобів особистої гігієни спонукало виробників використовувати ефірні олії у косметичній, парфумерній, харчовій галузях. Існує безліч різних способів одержання ефірної олії. Перевага віддається щадним способам, так як ароматні олії термолабільні і легко випаровуються. Основні методи, які використовують для отримання ефірних олій з рослинної сировини є: дистиляція парою; пресування (механічний метод); екстракція (леткими та нелеткими розчинниками).

Аналіз проблематики та останніх досліджень. Залежно від характеру сировини та основних властивостей олій для їх вилучення застосовують той чи інший спосіб, що дозволяє отримати найбільший вихід та найкращу якість.

Один з недоліків традиційних методів пов'язаний з термолабільністю ефірних олій. Компоненти ефірних олій зазнають хімічних змін (гідроліз, окислення) завдяки дії високої температури, тому якість витягнутих ефірних олій може знижуватися та також залежить від тривалості протікання процесу. Оскільки економіка, конкурентоспроможність, екологічність, енергоефективність і висока якість стають ключовими драйверами сучасного промислового виробництва, розвитку необхідних технологій екстракції олій, а класичні методи отримання ефірних олій не можуть цього забезпечити, то необхідно впровадження інноваційних технологій. Порівнюємо традиційні та інноваційні методи екстракції ефірних олій і проілюструємо це (табл.1) [2].

Таблиця 1

Порівняння традиційних та інноваційних методів екстракції ефірних олій

Традиційні методи	Інноваційні методи
Низька ефективність	Висока ефективність
Низька якість	Висока якість
Великий час екстракції	Малий час екстракції
Низька енергоефективність	Висока енергоефективність
Великі виброси CO ₂	Низькі виброси CO ₂

Інноваційні/нетрадиційні методи є "зеленими" за своєю суттю. Для подолання обмежень традиційних методів були запропоновані різні інноваційні методи екстракції (табл. 2). Вони менш трудомісткі, екологічно чисті, підвищують вихід та якість ефірних олій за рахунок меншого використання розчинників та енергії, а також допомагають уникнути використання токсичних хімікатів. Традиційна технологія передбачає передачу теплової енергії за допомогою механізмів теплопровідності та конвекції, що в кінцевому підсумку може спричинити коливання температурного градієнта всередині продукту. Тому було розроблено кілька нових методів нагрівання, які містять більшу ефективність.

Таблиця 2

Інноваційні та традиційні методи екстракції ефірних олій

Традиційні методи	Інноваційні методи
Гідродистиляція	Надкритична екстракція рідини
Дистиляція паром	Докритична рідинна екстракція
Екстракція	Мікрохвильова дистиляція паром
Прессування	Мікрохвильова екстракція без розчинника
Анфлераж	Мікрохвильова гідродифузія та гравітація
Мацерація	Ультрозвукова гідродистиляція
Екстракція методом Сокслета	Дистиляція з омичним нагріванням
	Дистиляція з використанням сонячної енергії

Розглянемо переваги та проблеми інноваційних технологій.

Надкритична рідинна екстракція. Надкритична рідинна екстракція - це складний метод виділення одного компонента із суміші з використанням надкритичної рідини як екстрагуючого розчинника, що складається з газів або рідин. Їх розчинювальна здатність контролюється температурою та/або тиском. Однак цей метод використовується для виділення тих хімічних класів летких олій, які не можна видобувати методом парової дистиляції. Найбільш часто використовуваним розчинником є діоксид вуглецю (CO₂) з кількох практичних причин, таких як низький критичний тиск (73,8 бар) і температура (31°C), незаймистість, відсутність корозії, безпека, дешевизна і доступність у високій чистоті. Використовуючи зниження тиску, його можна легко виділити з рослинного матеріалу. Недоліком є те, що CO₂ неполярний, тому він не може екстрагувати полярні аналіти але може використовуватися як надкритична рідина з такими співрозчинниками, як диметиловий ефір, етан, етиленетанол, фреони, метанол, закис азоту, пропан, етилен тощо. Додаткові переваги цього методу включають забезпечення високоякісного асортименту виділених компонентів з покращеними біологічними та функціональними властивостями порівняно з іншими продуктами, отриманими за допомогою методу гідродистиляції. Цей метод є екологічно чистим, оскільки нетоксичні розчинники, що використовуються в процесі екстракції, не залишають шкідливих залишків. Розчинник для екстракції може бути швидко виділений з екстракту через його високу летючість. Компоненти з високою температурою кипіння легко екстрагуються при низьких температурах, які вважаються придатними для термолабільних компонентів. Основним обмеженням цього методу є складність системи, що збільшує вартість обладнання. Іншим недоліком є те, що підвищений тиск вимагає більш значних початкових капітальних витрат.

Докритична екстракція рідини. Докритична екстракція рідини має місце, коли рідина досягає тиску, більшого за P_c (критичний тиск), але меншого за T_c (критичну температуру). Цей стан називається докритичним. Розчинниками, що використовуються для екстракції ефірних олій у цьому процесі, є H₂O і CO₂. Докритичний стан рідини має кілька переваг: знижена густина, менша в'язкість і краща дифузія в газорідному середовищі. Оскільки ця процедура екстракції виконується при помірній робочій температурі, вона вважається найкращою альтернативною стратегією для термолабільних компонентів. Переваги цього методу полягають у тому, що він простий, менш трудомісткий, економічно ефективний та екологічно чистий. Він є потужною альтернативою методу екстракції ефірних олій, оскільки дозволяє швидко виділити ефірну олію. Основним недоліком цього методу екстракції є те, що він вимагає високого тиску для підтримання розчинника в докритичному стані, що збільшує операційні витрати.

Екстракція за допомогою ультразвуку. Метод екстракції за допомогою ультразвуку дозволяє високо-селективно і швидко відокремлювати леткі олії від рослинного матеріалу. Принцип цього методу полягає в тому, що він розвиває кавітацію деяких крихлих бульбашок в системі розчинника завдяки проходженню потоку ультразвукових хвиль, які зазвичай дозволяють отримати більш значний відсоток системи розчинника в рослинному матеріалі, що збільшує площу поверхні. Рослинну сировину занурюють у воду або інший розчинник (наприклад, метанол або етанол) і піддають ультразвуковій обробці. Цей метод передбачає вилучення компонентів ефірної олії з листя, насіння та квітів. Факторами, які суттєво впливають на відсотковий вихід та якість ефірних олій, є частота ультразвуку, тривалість ультразвукової обробки, час занурення, температура екстракції, робочий цикл ультразвуку, особливості та розмір рослинних матеріалів. Цей метод є вигідним для термочутливих комбінацій завдяки середній температурі та економії енергії. Це підходящий метод екстракції для отримання високоцінних летючих олій. Ефективність екстракції може бути підвищена за допомогою цього методу, який може спричинити руйнування клітинних стінок рослин і покращення масопереносу за рахунок утворення ефекту кавітаційного булькання. Недоліками цього методу є низька чистота, низька ефективність і тривалість процесу [3].

Дистиляція з омичним нагріванням води. Дистиляція води з омичним нагріванням - це революційний процес для виділення ефірних олій, який використовує омичний нагрів і вимагає меншої потужності (на мл. рідини). Контроль гомогенності обробки вимагає максимально точних вхідних даних для моделювання. Швидкість нагрівання пропорційна квадрату напруженості електричного поля і провідності середовища. Цей метод використовується для швидкого виділення різних летких олій. Омичне нагрівання є дуже енерго-ефективною і безпечною технологією. Вона забезпечує швидке і відносно однорідне нагрівання. Якість ефірних олій, отриманих за допомогою цього методу, є високою. Основним недоліком омичного нагрівання є висока вартість, корозія електродів і необхідність постійного очищення [3].

Сонячна дистиляція. Розроблено нову технологію для підвищення ефективності процесу дистиляції шляхом використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячне світло. Цей метод використовує приблизно однакову кількість теплової енергії на одиницю ваги рослинного матеріалу. Для сонячної дистиляції використовуються стаціонарний ресивер Шеффлера, конденсатор, фокус-концентратор, олійний сепаратор, перегінний куб та інші компоненти. Кількість енергії, доступної для процесу дистиляції, визначається інтенсивністю сонячного випромінювання та тепловою і оптичною ефективністю сонячної дистиляції. Це недорогий метод вилучення ефірних олій з лікарських рослин. Ефірні олії з різних рослинних джерел екстрагуються за допомогою системи сонячної дистиляції, таких як листя евкالیпта, листя м'яти, бутони гвоздики, насіння фенхелю, базилік, лаванда, кмин, кардамон, апельсин, лимон, розмарин, цитрусові, цимбопогон тощо [3].

До революційних методів вилучення ефірних олій можна віднести електродинамічні технології.

Мікрохвильова дистиляція паром. Цей підхід працює шляхом зміни полярності води, а потім нагрівання її мікрохвилями. Електромагнітна енергія перетворюється на мікрохвильову енергію, яка безпосередньо генерується через молекулярну взаємодію між ароматичними рослинами (матеріалами) та електромагнітним полем. Хімічне представлення системи полягає в наступному - перенесення відбувається в одному напрямку, тобто з внутрішніх клітин назовні. Фактори, що впливають на ефективність цього методу включають: час, температуру, фізико-хімічні властивості екстрагованих сполук, діелектричні властивості суміші зразків і тип розчинника. Цей метод використовується в промисловості, і є відмінним універсальним засібом отримання ефірних олій з широкого спектру рослинних матеріалів у відповідних умовах, який демонструє швидку екстракцію при низькій витраті розчинника. Екологічно чистий метод завдяки меншим викидам вуглекислого газу в атмосферу, також забезпечує захист термолабільних сполук, а його ефективність базується на діелектричній проникності рослинного матеріалу і води відповідно [2].

Кинетичне дослідження показує, що мікрохвильова дистиляція з паром з вигодою у часі екстракції до 75 % дає ефірну олію з кращою антиоксидантною активністю, що підкреслює значний потенціал як природної антиоксидантної добавки [3]. Існує лише один недолік: мікрохвильова обробка може призвести до змін у стереохімії сполук і може перетворювати їх з одного ізомеру в інший [3].

Мікрохвильова екстракція без розчинника. Мікрохвильова екстракція без розчинників — це комбінація мікрохвильового нагрівання та сухої дистиляції, що виконується при атмосферному тиску без додавання розчинника чи води. Виділення і концентрування летких сполук здійснюються в одну стадію. Метод дає ефірну олію з більшою кількістю більш цінних сполук, насичених киснем, і дозволяє істотно заощадити витрати з точки зору часу, енергії та рослинного матеріалу. Цей метод є екологічно чистою технологією і виглядає як хороша альтернатива для вилучення ефірних олій з ароматичних рослин. Втрати деяких летких сполук, низька ефективність екстракції, деградація ненасичених або складноефірних сполук через термічні або гідролітичні ефекти та залишки токсичного розчинника в екстракті можуть спостерігатися за допомогою цих методів екстракції. Ці недоліки призвели до розгляду використання нової «зеленої» техніки в екстракції ефірної олії, яка зазвичай використовує менше розчинника та енергії [3].

Метод мікрохвильової дистиляції без розчинника. Заснований на відносно простому принципі, цей метод передбачає розміщення рослинного матеріалу в мікрохвильовому реакторі без будь-якого додавання розчинника або води. Внутрішнє нагрівання води в рослинному матеріалі розтягує рослинні клітини та при-

зводить до розриву залоз і олійних вмістилищ. Таким чином, цей процес звільняє ефірну олію, яка випаровується водою на місці рослинного матеріалу. Система охолодження поза мікрохвильовою піччю постійно конденсує дистилат [3].

Мікрохвильова гідродифузія та гравітація. Мікрохвильова гідродифузія та гравітація є одним з нових екологічно чистих методів видобутку летких олій. Ця технологія використовує мікрохвилі та земне тяжіння для збору та вилучення летких олій, які гідродифундують з внутрішніх клітин до зовнішніх частин рослинного матеріалу. Зазвичай екстракцію проводять при атмосферному тиску без додавання розчинника. Цей метод використовується для швидкого виділення летких поліекстрактів. Перевагою цього методу є те, що він економічний, вимагає менше енергії, є високоєфективним і не потребує розчинника/води. Час екстракції вимірюється хвилинами порівняно з гідродистиляцією, яка займає години [4].

Розглянуті роботи [2-3] визначають технічні ідеї інновацій залучення мікрохвильових технологій до процесів отримання ефірних олій, наукові принципи та практичні рекомендації відсутні. Наразі, активно проводяться дослідження використання мікрохвильових технологій в харчових та фармацевтичних виробництвах. Так, в [4] досліджено структурні та фізико-хімічні властивості прежелатинізованого кукурудзяного крохмалю, підданого мікрохвильовій обробці, та їх вплив на вивільнення лікарського засобу з таблеток. В [5] проведено кінетичне моделювання конвективного та мікрохвильового сушіння картопляних відходів та їх вплив на вміст антиоксидантів. Завдання доцільності попередньої обробки у мікрохвильовому полі квітів шафрану із оцінкою якості готового продукту вирішувалось в роботі [6]. Розробка «зеленого» інноваційного пілотного проекту напівпромислового масштабу в поєднанні мікрохвильове нагрівання та відцентрова сила для вилучення ефірних олій та фенольні сполуки з апельсинової кірки проводилося у [7]. Розглядався метод вакуумної мікрохвильової екстракції як технологія екоіндустрії, досліджено кінетику, ефективність та вплив на біоактивність сполук [8].

Висока ефективність електродинамічних технологій обґрунтована в роботі [9]. Новим підходом до проведення процесу екстрагування є ініціювання гібридного процесу [10] для організації ефекту механодифузії [11]. По суті, це адресна доставка енергії до нанорозмірних структур сировини [12]. Наведено аналіз енергетичних характеристик електродинамічного обладнання [13], кінетики взаємодії вологого матеріалу із мікрохвильовим полем [14], ефективності обладнання при утилізації відходів кавового виробництва [13, 15], при переробці шипшини [15]. Характеристики електродинамічних апаратів наведено на сайті [16].

Головний висновок аналізу в тому, що електродинамічні технології мають значні перспективи. Тому, ставиться задача залучити їх до процесів отримання екстрактів ефірних олій.

Різні ефірні олії можуть використовуватися як натуральні харчові добавки і видобуваються з різних рослин. Багато дослідників довели ефективність інновацій у традиційних методах вилучення летких олій з різних рослинних матеріалів. Створення, вдосконалення та розширення цих досягнень від лабораторних до пілотних та промислових масштабів потребує моделювання експериментальних даних. Мета науковців-дослідників у двадцять першому столітті - стимулювати розвиток традиційних процесів екстракції ефірних олій, які підвищують вихід і якість летких олій для ароматерапії та фармацевтичного застосування. З іншого боку, інноваційні підходи, включаючи мікрохвильову, ультразвукову, омичну екстракцію та екстракцію за допомогою сонячної енергії, можна поєднувати з традиційними методами екстракції для ефективного виробництва ефірних олій. Подальші дослідження необхідні для пошуку ефірних олій з новими біологічними властивостями або функціональними можливостями.

Обговорення результатів експериментальних досліджень. Експериментальне моделювання проводилось на стенді (рис. 1)

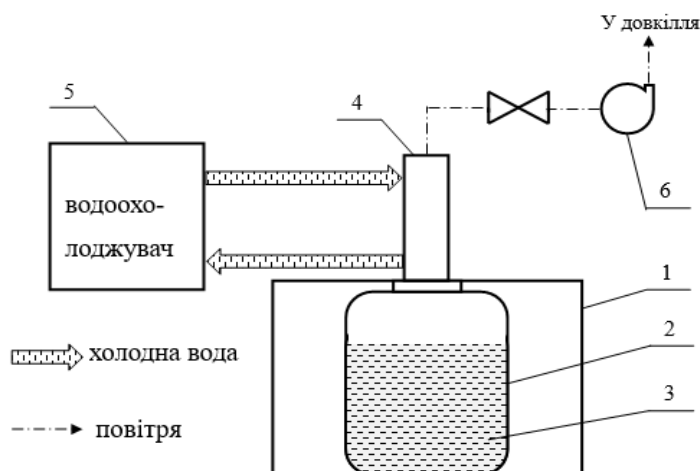


Рис 1 – Схема експериментального стенду

В основі стенду резонаторна камера 1, в якій розташовано радіо прозора ємність 2 із сировиною 3. Паровий простір ємності 2 виходить до зворотного холодильнику 4, в якому циркулює холодна вода із водоохолоджувача 5. Вакуум у системі забезпечується вакуум-насосом 6 та контролюється манометром. Відбір проб із екстракту 3 проводиться спеціальним пристроєм через 5...10 хвилин. Концентрація екстракту визначається рефрактометром HI 96801 HANNA INSTRUMENTS та за даними оптичної щільності по Carl Zeiss Jena spectrophotometer SPEKOL. Потужність електромагнітного поля регулюється, витрати електричної енергії контролюються енергоміром Feron TM55. Температура екстракту визначається дистанційно тепловізором FLIR TG167.

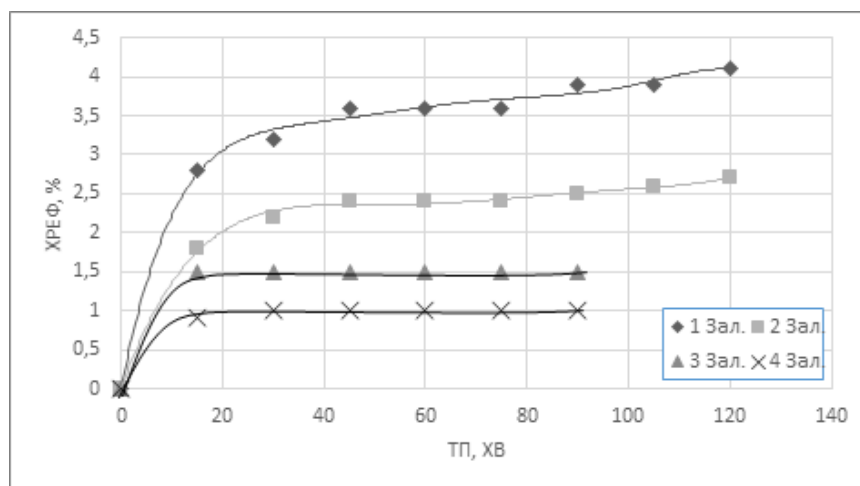
Проведено дослідження кінетики екстрагування квітів лаванди на об'ємному вакуумному мікрохвильовому екстракторі (рис.1). Визначена кінетики виснаження сировини для ряду заливів за режимами (табл.3).

Таблиця 3

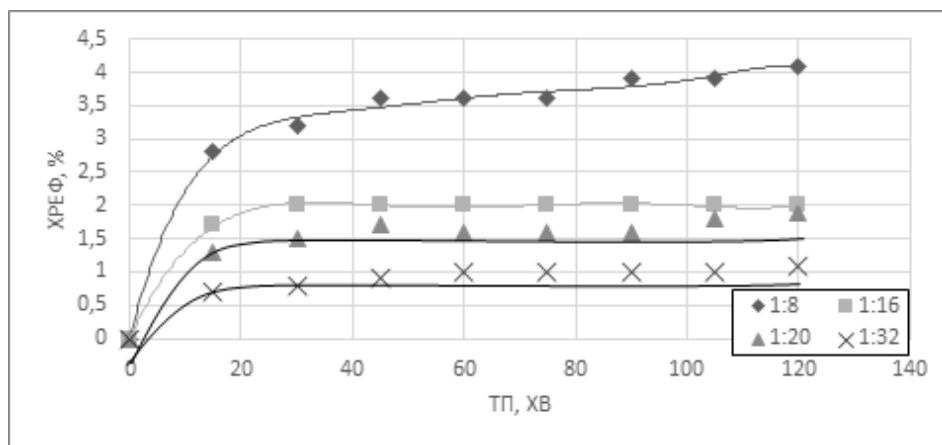
Режим дослідів із кінетики виснаження квітів лаванди

Маса квітів, Мс, г	Маса води, Ме, г	Тиск Р, кПа	Температура, t, C°	Час, τ, хв	Потужність, N, Вт	Гідромодуль, n
80	640	100	98 - 100	120	630	1:8

Результати дослідів представлено на рис. 2.

**Рис. 2 – Кінетика виснаження квітів лаванди**

Друга серія дослідів мала завдання визначити вплив гідромодулю на кінетики екстрагування. Досліджувались гідромодулі: «1:8», «1:16», «1:20», «1:32». Всі інші параметрами не відрізнялися від даних (табл.3).

**Рис. 3 – Вплив гідромодулю на кінетику екстрагування квітів лаванди**

Наступна серія дослідів проведена на різних зразках гісопу (табл.4). Маса сировини складала 150 г, а маса екстрагенту (води) – 1200г. Потужність, тиск та температура підтримувалась як у табл.3.

Таблиця 4

Характеристика об'єктів досліджень, гісопу марки Маркіз

Варіант	Характеристика	Хк, °brix
1	Синій, (Біочар + Граундфікс)	1,35
2	Синій, (Біочар)	1,6
3	Синій, (Граундфікс)	1,3
4	Синій, контроль	1,5
5	Рожевий, (Біочар + Граундфікс)	1,4
6	Рожевий, (Біочар)	1,56
7	Рожевий, (Граундфікс)	1,5
8	Рожевий, контроль	1,7
9	Білий, (Біочар + Граундфікс)	1,55

Результати досліджень кінетичних залежностей наведено на рис. 4.

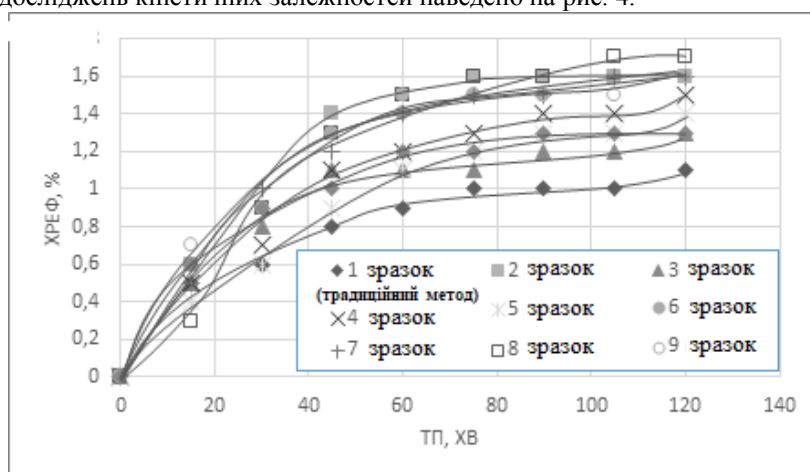


Рис. 4 – Дослідження кінетики екстрагування гісопу

Значення кінцевих концентрацій (Хк) зразків після екстрагування на протязі 120 хвилин наведено в табл. 4. Добре впливає на інтенсивність масоперенесення Біочар. Так, у всіх зразках наявність Біочару позитивно впливало на значення Хк, (рис.4). Вплив електромагнітного поля визначено на зразку №1. Нижня крива на рис.4 ілюструє кінетику екстрагування за традиційною технологією. Видно, що інтенсивність процесу екстрагування в електромагнітному полі зростає у 1,5 разів.

За об'ємом виконаних експериментальних досліджень зроблено наступні висновки.

Висновки. При екстрагуванні з квітів лаванди основний час масоперенесення триває 30...40 хвилин при першому циклі, та 20 хвилин при наступних циклах повторного екстрагування (рис.2). При цьому, циклічне екстрагування вилучає більше цільових компонентів, ніж одноразове. Визначено вплив гідромодуля на інтенсивність масоперенесення (рис.3), що характеризує науково-технічне протиріччя між факторами підвищення значення рушійної сили та концентрацією екстракту. Отримані результати (рис.2, 3) є базою для організації енергоефективних режимів екстрагування із квітів лаванди.

Визначено експериментальним шляхом, що схема обробки зразків гісопу сорту «Маркіз» суттєво впливають на кінетику екстрагування (рис.4). Концентрація екстрактів відрізняється у 1,5 разів. Для рекомендації доцільних режимів екстрагування потрібні комплексні дослідження по виходу із екстрактів безпосередньо ефірних олій.

References

1. Trade statistics for international business development monthly, quarterly and yearly trade data. Import & export values, volumes, growth rates, market shares, etc (n.d.) Retrieved from: <http://www.trademap.org/>
2. Naima Sahraoui, Chahrazed Bouteckdjiret. (2023). Innovative methods for extraction of essential oils from medicinal plants *International Journal of Secondary Metabolite* 10(2), 190-230, DOI:10.21448/ijsm.1121860.
3. Naima Sahraoui, Chahrazed Bouteckdjiret. (2015). Innovative Process of Essential Oil Extraction: Steam Distillation Assisted by Microwave, *Progress in Clean Energy*, 1, 831-841 DOI:10.1007/978-3-319-16709-1_61.
4. Yuyu Zheng, Ruixiang Liu, Xiaohui Hou, Hanyu Wu, Dengke Yin, Ye Yang. (2023). Structural and physicochemical properties of microwave-processing pregelatinized maize starch, and its influence on drug release from tablets. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 84, 104452 DOI:10.1016/j.jddst.2023.104452
5. Fatiha Brahmi, Inmaculada Mateos-Aparicio, Khokha Mouhoubi, Sara Guemouni, Tassadit Sahki, Farid

- Dahmoune, Ferroudja Belmehdi, Chafiaa Bessai, Khodir Madani, Lila Boulekbache-Makhlouf (2023). Kinetic Modeling of Convective and Microwave Drying of Potat Peels and Their Effects on Antioxidant Content and Capacity. *Antioxidants*, 12, 638. DOI:10.3390/antiox12030638.
6. Ana Álvarez, Sara Terreros, María J. Cocero and Rafael B. Mato. (2021). Microwave Pretreatment for the Extraction of Anthocyanins from Saffron Flowers: Assessment of Product Quality, *Antioxidants*, 10, 1054. DOI:10.3390/antiox10071054.
 7. Alice Angoy, Christian Ginies, Pascale Goupy, Isabelle Bornard, Pascal Ginisty, Alain Sommier, Marc Valat, Farid Chemat (2020). Development of a green innovative semi-industrial scale pilot combined microwave heating and centrifugal force to extract essential oils and phenolic compounds from orange peels *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 61, 102338.
 8. Abdul Hameed, Abid Aslam Maan, Akmal Nazir, Usman Amin, Muhammad Kashif Iqbal Khan, Muhammad Usman Khan, Mohammad Ali Shariati, Maksim Rebezov, José M. Lorenzo. (2023). Microwave - Vacuum Extraction Technique as a Green and Clean Label Technology: Kinetics, Efficiency Analysis, and Effect on Bioactive Compounds *Food Analytical Methods*, 16, 525–540 DOI:10.1007/s12161-022-02437-6
 9. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilov A.V., Sirotyuk I.V. (2021). Electrodynamics Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 57 (3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
 10. Burdo O.G., Levitsky A.P., Trishyn F.A., Terziev S.G., Sirotyuk I.V., Burdo A.K., Lapinska A.P., Molchanov M.Yu. (2023). Electrodynamics Technologies in the Eco-industry of Food and Pharmaceutical Production *Problemele Energeticii Regionale* 2 (58) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
 11. Burdo O. G. (2021). Role of Food Energy Technologies in Solving Global Mankind Problems *Problemele Energeticii Regionale*, 3 (51) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.09>.
 12. Burdo O.G., Zykov A. V., Terziev S. G., Ruzhitskaya N.V. (2016). Nanotechnological Innovation in Food Industry *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 6 (3), 144-150.
 13. Burdo O., Bezbakh I., Zykov A., Terziev S., Gavrilov A., Sirotyuk I., Mazurenko I., Yunbo Li. (2020). Development of power-efficient and environmentally safe coffee product technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 11(103), 6-14.
 14. Burdo O. G., Bandura V. N., & Levtrinskaya Y. O. (2018). Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), 210-218.
 15. Burdo O.G., Sirotyuk I.V., Alhury U., Levtrinska J.O. (2016). Microwave Energy as an Intensification Factor in the Heat-Mass Transfer and the Polyextract Formation *Problemele Energeticii Regionale*, 1 (36) DOI:10.5281/zenodo.1217259
 16. Nahofood: Tekhnolohii adresnoi dostavky enerhii i nanoenerhotekhnolohii Retrieved at <http://nanofood.com.ua>

EXPERIMENTAL SIMULATION OF ESSENTIAL OIL EXTRACTION PROCESSES IN MICROWAVE FIELD

Kovalenko O.O.², SciD, Associate Professor, Slavinsky R.L.¹, graduate student, Fedosov Y. S., graduate student, Slavinska V.O.¹, engineer, Al-Hamad I.M.¹, graduate student

¹ Odessa National Technological University, Odesa, Ukraine

² Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. The growth trends of the global market of essential oils and the demand for natural substances are the drivers of the spread of the use of essential oils in various sectors of the national economy. There are many methods of obtaining essential oils, the article describes and compares traditional and innovative methods that slow down the risk of losing the main thermolabile components of plant raw materials, preserve quality, reduce the extraction time, act environmentally safe and increase the percentage of essential oils yield.

Due to the fact that traditional methods of obtaining essential oils have many disadvantages, the main one of which is the thermal stability of essential oils at high temperatures, there is a need for innovative methods that will reduce the influence of these factors.

The article presents experimental data of experiments on different samples of lavender flowers and hyssop of the "Marquis" variety. An experimental stand for extracting essential oil from lavender and hyssop using an innovative method — microwave steam distillation — is illustrated.

This process is a combination of traditional technologies, namely, steam distillation and innovative technology, microwave heating. Microwave heating helped initiate and create mass and heat transfer from within the plant matrices to the outside, resulting in a significant reduction in extraction time, with influence of mechano-diffusion. Based on the analysis of the methods and on the basis of experimental data, we conclude that electrodynamic systems have significant prospects for widespread use. Therefore, the task is to involve them in the processes of obtaining extracts of essential oils. The extraction kinetics and the influence of the hydromodule on the extraction process were studied.

Cyclic extraction was found to extract more target components than single extraction.

The influence of the hydromodule on the intensity of mass transfer characterizes the scientific and technical contradiction between the factors of increasing the value of the driving force and the concentration of the extract. The influence of the processing scheme on the intensity of mass transfer was considered using the example of "Marquis" type hyssop. The obtained results are the basis for the organization of energy-efficient modes of extraction from lavender and hyssop flowers.

Keywords: microwave steam distillation, extracting essential oil from lavender and hyssop, innovative methods

Список використаної літератури

1. <http://www.trademap.org/> - сайт «Trade statistics for international business development monthly, quarterly and yearly trade data. Import & export values, volumes, growth rates, market shares, etc.»
2. Naima Sahraoui, Chahrazed Boutekedjiret. 2023. Innovative methods for extraction of essential oils from medicinal plants International Journal of Secondary Metabolite 10(2):190-230, June 2023. DOI:10.21448/ijsm.1121860.
3. Naima Sahraoui, Chahrazed Boutekedjiret. Innovative Process of Essential Oil Extraction: Steam Distillation Assisted by Microwave, Progress in Clean Energy 2015., Volume 1 (pp.831-841), August. DOI:10.1007/978-3-319-16709-1_61.
4. Yuyu Zheng, Ruixiang Liu, Xiaohui Hou, Hanyu Wu, Dengke Yin, Ye Yang. Structural and physico chemical properties of microwave-processing pregelatinized maize starch, and its influence on drug release from tablets// Journal of Drug Delivery Science and Technology 2023., Volume 84, June, 104452 DOI:10.1016/j.jddst.2023.104452
5. Fatiha Brahmi, Inmaculada Mateos-Aparicio, Khokha Mouhoubi, Sara Guemouni, Tassadit Sahki, Farid Dahmoune, Ferroudja Belmehdi, Chafiaa Bessai, Khodir Madani, Lila Boulekbache-Makhlouf Kinetic Modeling of Convective and Microwave Drying of Potat Peels and Their Effects on Antioxidant Content and Capacity // Antioxidants, 2023., 12, 638. DOI:10.3390/antiox12030638.
6. Ana Álvarez, Sara Terreros, María J. Cocero and Rafael B. Mato. Microwave Pretreatment for the Extraction of Anthocyanins from Saffron Flowers: Assessment of Product Quality // Antioxidants 2021., 10, 1054. DOI:10.3390/antiox10071054.
7. Alice Angoy, Christian Ginies, Pascale Goupy, Isabelle Bornard, Pascal Ginisty, Alain Sommier, Marc Valat, Farid Chemat. Development of a green innovative semi-industrial scale pilot combined microwave heating and centrifugal force to extract essential oils and phenolic compounds from orange peels // Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020., 61.102338.
8. Abdul Hameed, Abid Aslam Maan, Akmal Nazir, Usman Amin, Muhammad Kashif Iqbal Khan, Muhammad Usman Khan, Mohammad Ali Shariati, Maksim Rebezov, José M. Lorenzo. (2023). Microwave - Vacuum Extraction Technique as a Green and Clean Label Technology: Kinetics, Efficiency Analysis, and Effect on Bioactive Compounds // Food Analytical Methods 16:525–540 DOI:10.1007/s12161-022-02437-6
9. О.Г. Бурдо, Ф.А. Трішин, С.Г. Терзієв, А.В. Гаврилов, І.В. Сиротюк (2021). Електродинамічні процеси як ефективне вирішення проблем харчової промисловості // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 57 (3), 330-344 <https://doi.org/10.3103/s1068375521030030>.
10. Бурдо О.Г., Левицький А.П., Трішин Ф.А., Терзієв С.Г., Сиротюк І.В., Бурдо А.К., Лапінська А.П., Молчанов М.Ю. (2023). Електродинамічні технології в еко-індустрії харчової та фармацевтичної промисловостей // Problemele Energeticii Regionale 2 (58) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.2-58-11>.
11. Бурдо О.Г. (2021). Роль харчових енергетичних технологій у вирішенні глобальних проблем людства // Problemele Energeticii Regionale 3 (51) DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.09>.
12. Нанотехнологічні інновації в харчовій промисловості [Текст] / О.Г. Бурдо, А. В. Зиков, С.Г. Терзієв, Н.В. Ружицька (2016). International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). Vol. 6 - Issue 3 - P. 144-150.
13. О. Бурдо, І. Безбах, А. Зиков, С. Терзієв, А. Гаврилов, І. Сиротюк, І. Мазуренко, Юнбо Лі. Розробка енергоефективних та екологічно безпечних технологій харчових продуктів. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020., 11(103), 6-14.
14. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2018., No. 2 Vol. 54. P. 210-218.
15. Бурдо О.Г., Сиротюк І.В., Альгурі У., Левтринська Ю.О.. Мікрохвильова енергія як фактор інтенсифікації тепло масообміну та утворення полі екстракту // Problemele Energeticii Regionale, 2016. 1 (36) DOI:10.5281/zenodo.1217259
16. <http://nanofood.com.ua> – сайт Технології адресної доставки енергії і наноенерготехнології.

Отримано в редакцію 17.06.2023

Прийнято до друку 27.11.2023

Received 17.06.2023

Approved 27.11.2023