

П. В. Гетьман, аспірант, О. М. Півень, канд. техн. наук, доцент

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ НАДКРИТИЧНОЇ CO₂-ЕКСТРАКЦІЇ ПРЯНОЩІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: надкритична екстракція, вуглекислота, ефірні олії, натуральний продукт, прянощі, екстракт, коріандр, чорний перець, мускат, розмарин.

Вступ. В Україні та інших європейських країнах в останні десятиріччя спостерігається значне зростання попиту на продукти з натуральним складом. Споживачі дедалі більше цінують якість, екологічність та безпечність харчових продуктів, які дозволяють підтримати та зберегти здоров'я. Зростає попит на натуральні продукти [1] які не містять, зокрема, екстрактів прянощів, отриманих із використанням органічних розчинників (олеорезинів). Навіть невелика залишкова кількість цих розчинників в харчовому продукті може негативно впливати на здоров'я людини. Зараз активно розвиваються технології [2], що дозволяють отримувати натуральні екстракти з високим рівнем чистоти та контрольованим вмістом смако-ароматичних та біологічно активних сполук. Однією з таких інноваційних технологій є надкритична CO₂-екстракція [3, 4], що поєднує екологічність, високу селективність, збереження термолабільних речовин. Завдяки використанню вуглекислого газу у надкритичному стані як розчинника, вдається уникнути залишків органічних розчинників у кінцевому продукті та зберегти природний ароматичний профіль вихідних прянощів та трав .

При розробці натуральних продуктів виникає необхідність заміни в рецептурах наявних олеорезинів на натуральні CO₂-екстракти із збереженням або покращенням органолептичних властивостей готових харчових продуктів. CO₂-екстракція при цьому повинна забезпечувати вилучення із прянощів та ароматичних трав як летких ефірних олій, так і нелетких жирних олій, восків, смол, окремих груп смако-ароматичних речовин, речовин із антиоксидантною та антимікробною активністю.

Більшість наукових робіт зосереджуються переважно на отриманні якнайбільшого виходу загального екстракту, зменшенні тривалості процесу екстракції, оптимізації виробничих витрат або порівнянні хімічного складу екстрактів в залежності від походження сировини. Натомість проблема цілеспрямованого отримання екстрактів із заданою кількістю основних біологічно активних компонентів, які більшою мірою відповідають за смак продукту (наприклад, піперину у чорному перці, капсаїцину в перці чилі чи куркуміну в куркумі) та ефірних олій, які відповідають більшою мірою за аромат харчового продукту, залишається недостатньо вивченою. Саме цей аспект є критично важливим для розробки комплексних сумішей екстрактів, які можуть забезпечити стабільність смаку та аромату натуральних харчових продуктів після виключення із рецептур цих продуктів відповідних олеорезинів.

Таким чином, аналіз сучасного стану досліджень у сфері надкритичної CO₂-екстракції прянощів є актуальним завданням, адже він дозволяє виявити наявні досягнення, прогалини у наукових розробках та окреслити перспективні напрямки подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. В виробництві різних груп харчових продуктів використовують як натуральні (подрібнені та, інколи, цілі) спеції та прянощі, так і екстракти цих прянощів. Використання подрібнених прянощів не завжди є бажаним та може бути навіть неприпустимим через наявність видимих включень в готовому продукті, можливість зараження прянощів мікотоксинами та неорганічними речовинами-ксенобіотиками з їх відповідним потраплянням у готовий харчовий продукт, обмежений термін придатності подрібнених спецій. Тому в останній час все частіше використовують їх відповідні екстракти. В залежності від використаного екстрагента, екстракти поділяють на:

– олеорезини – це концентровані екстракти трав та спецій, які являють собою суміші летких ефірних олій та нелетких жирних олій, восків, смол. Їх отримують із використанням органічних розчинників: гексан, ацетон, спирт, етилацетат, петролейний ефір [5]. Їх перевагами є високий вихід готового продукту та відносна дешевизна отриманих екстрактів. Недоліками є деяка зміна органолептичних властивостей у порівнянні із свіжоподрібненими прянощами, можливість окиснення ароматичних компонентів в процесі екстракції та на стадії видалення розчиннику через відносно високу температуру та наявність кисню, ризик негативного впливу на здоров'я людей залишкових кількостей органічних розчинників;

– ефірні олії – це суміш летких хімічних компонентів, які отримують за допомогою водяної пари методом гідро- чи пародистиляції. Їх перевагою є яскраво виражений аромат прянощі. Недоліками використання водяної пари є, відповідно, відносно малий вихід готового продукту із сировини та неможливість екстрагувати нелеткі тригліцериди, воски, смоли, фенольні сполуки, які відповідають за смак вихідної прянощі, негативний вплив гарячої пари на хімічні складові прянощів при високих температурах [6];

– надкритичні CO₂-екстракти – це екстракти, отримані за допомогою діоксиду вуглецю у надкритичному (флюїдному) стані, при температурі більше ніж 304,1 К та тиску більше ніж 7,33 МПа. Найбільш поширене пілотно-експериментальне та промислове обладнання дозволяє проводити екстракцію при тиску до 40 МПа та температурі до 80 °С. CO₂ в такому стані екстрагує як леткі ефірні олії, так і нелеткі жирні олії, воски, смоли. Перевагами використання як екстрагента діоксиду вуглецю є 100 % натуральність та висока чистота екстрактів без залишків розчинників; збереження смаку та аромату вихідної прянощі; відносно високий вихід екстракту у порівнянні із ефірними оліями, отриманими пародистиляцією; збереження термолабільних компонентів за рахунок використання відносно невисоких температур; відсутність окиснення в процесі екстракції; енергоефективність та екологічність виробництва. Надкритична CO₂-екстракція, дозволяє, змінюючи параметри екстракції, отримувати з однієї і тої ж сировини екстракти із різним вмістом ароматичних компонентів, які потрібні для окремих готових харчових продуктів. Про цьому інші речовини, які містяться у прянощі, зали-

шаються у шроті, який може бути використаний як смако-ароматична добавка для інших продуктів без додаткової обробки через свою безпечність та мікробіологічну стабільність за рахунок використання інертного вуглекислого газу. Відносна дорожнеча обладнання та високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу є недоліками цієї технології [7, 8, 9].

Згідно із [10] ефірні олії визначаються як «Продукти, отримані з рослинної сировини шляхом дистиляції водою або паром, механічного пресування (для цитрусових) або сухої дистиляції. Вони є леткими ароматичними речовинами, що складаються переважно з терпенів та їх похідних». Олеорезини та надкритичні CO₂-екстракти містять, окрім ефірних олій, нелеткі компоненти, а вміст ефірних олій є одним із головних показників якості, який характеризує органолептичні властивості цих екстрактів. Вміст ефірних олій в рослинній сировині визначають за ДСТУ ISO 6571:2014 [11], згідно із яким термін «вміст ефірної олії» визначається як: «об'єм ефірної олії, отриманої з певної маси сухої рослинної сировини, виражений у мілілітрах на 100 грамів». ДСТУ ISO 6571:2014 є тотожним міжнародному стандарту ISO 6571:2008 [12]. Для визначення вмісту ефірних олій в олеорезинах чи CO₂-екстрактах немає затвердженого стандарту в Україні та у світі, тому виробники екстрактів адаптують цей стандарт ISO 6571:2008 [12], призначений для рослинної сировини, складаючи свої внутрішні методики для визначення вмісту ефірних олій в екстрактах. Комерційно доступні екстракти прянощів найчастіше містять від 5 до 80 мл/100 г ефірних олій.

Нижче наведений огляд стану розробок із надкритичної екстракції по окремим прянощам та травам.

Коріандр

Коріандр (лат. *Coriandrum sativum*), більш відомий як кінза, – це однорічна трав'яниста пряна рослина з роду *Coriandrum* родини парасолькових (Аріасеае). Вважається, що батьківщиною коріандру є Південна та Мала Азія, де його культивують з давніх часів і вирощують донині. Згодом ця культура поширилася в інші регіони, зокрема в Європу та Середземномор'я. Сьогодні коріандр вирощують у промислових масштабах у Болгарії, Румунії, Молдові та Україні, а також у багатьох країнах із теплим кліматом, де він є важливим пряним і технічним видом [13].

У харчовій, фармацевтичній та парфумерній промисловості найбільшу цінність становлять висушені плоди (насіння) коріандру, що є джерелом цінних жирних та ефірних олій. Насіння містить у середньому 20–25 % жирної олії, яка представлена тригліциеридами олеїнової (25–30 %), ізоолеїнової (50–55 %), лінолевої (10–15 %), пальмітинової (3–5 %), стеаринової (1–2 %) та миристинової (0,5–1,0 % кислот). Крім того, у плодах міститься 1,0–3,0 % ефірної олії, у складі якої переважає ліналоол (60–70 %), а також камфора (5–8 %), гераніол (4–5 %), α -пінен та інші ароматичні компоненти. Ефірна олія обумовлює характерний аромат і високу цінність даної культури в харчовій промисловості, а жирна олія обумовлює смак прянощі, тому і є сенс вилучати її при екстракції [14–16]

Автори [17] акцентують увагу на підборі параметрів для отримання найбільшого виходу екстракту із сировини, але не аналізують вміст отриманих екстрактів на вміст ефірної олії та нелетких компонентів.

Дослідники [18] приділяють увагу вибору параметрів для отримання окремо жирної олії та ефірної олії із коріандру, аналізується вплив різних параметрів на загальний вихід екстракту, аналізується хімічний вміст отриманих екстрактів. Проводиться також двоступенева екстракція для отримання спочатку екстракту з високим вмістом ефірної олії, а потім екстракту з більш високим вмістом жирної олії з тієї ж самої сировини. Але не вивчається саме вміст ефірних олій (визначення методом гідродистиляції [12] за Клевенджером) в отриманих екстрактах, тобто співвідношення ефірної та жирних олій, які по різному впливають на органолептичні показники.

Автори [19] роблять обґрунтований висновок, що екстракція в області «легкої» надкритичної CO₂-екстракції при 10 МПа призводить до отримання екстрактів із високим вмістом терпенів (основних компонентів ефірної олії), але також не аналізують, яке співвідношення летких та нелетких фракцій в отриманих екстрактах.

Дослідниками [20] аналізується хімічний склад CO₂-екстрактів коріандру, але не аналізується вміст ефірних олій в кожному отриманому екстракті.

Автори [21] приділяють увагу загальному виходу, але не якісному складу отриманого екстракту коріандру.

Дослідники [22] підбирають раціональні параметри для найбільшого виходу екстракту із сировини, аналізують хімічний склад отриманих екстрактів, але привертає увагу невеликий вихід екстракту, 0,57 % по відношенню до сировини, що не в змозі дати значний економічний ефект процесу екстракції.

Автори [23] після експериментів із декількома групами параметрів тиску та температури отримують раціональний з економічної точки зору вихід екстракту коріандру, 4,55 %, при 35 МПа і 308 К. Автори аналізують хімічний склад отриманого екстракту, але не проводять його кількісний аналіз на вміст ефірних олій. При цьому називаючи увесь отриманий екстракт «ефірною олією коріандру».

Наведений аналіз сучасного стану досліджень у сфері надкритичної CO₂-екстракції коріандру інших дослідників дали нам підґрунтя для більш детального вивчення цих питань. Наразі нами проведено дослідження по надкритичній CO₂-екстракції коріандру із метою заміни олеорезину коріандру із вмістом ефірних олій 25–30 % в рецептурах комплексних смако-ароматичних сумішей для м'ясних продуктів [24]. Було проведено 4 експерименти із різними значеннями тиску та температури, а методом послідовного відбору проб був виявлений раціональний час проведення екстракції. Нами були проаналізовані всі отримані екстракти щодо вмісту ефірних олій та проаналізований їх хімічний склад, обраний зразок із вмістом ефірних олій 28 %, що відповідає вмісту ефірних олій у олеорезині. Вихід даного екстракту складає 9,0 %, що підтверджує економічну доцільність проведення процесу надкритичної екстракції даної сировини та є вищим, ніж у наведених роботах [19–23].

Чорний перець

Чорний перець (*Piper nigrum*) – це багаторічна тропічна ліана з родини перцевих (*Piperaceae*), одна з найвідоміших і найпоширеніших прянощів у світі. Батьківщиною чорного перцю вважається південно-західна Індія (штат Керала), де його культивують понад 2 тисячі років. Звідти він поширився через арабських і європейських купців до

Середземномор'я, Азії та Африки, а згодом – по всьому світу. Сьогодні основними виробниками чорного перцю є В'єтнам, Індонезія, Індія, Бразилія та Шрі-Ланка.

У харчовій промисловості чорний перець цінується передусім за висушені недостиглі плоди («перець-горошок»), які надають стравам гострого смаку й характерного аромату. Смакова різкість зумовлена алкалоїдом піперином (4–8 % у плодах), а також спорідненими речовинами – хавіцином і піперетином. Характерний аромат формується завдяки ефірній олії (1,0–2,5 %), головними компонентами якої є сабінен, β -каріофілен, лімонен, пінен та інші терпени [25–26].

Технологія надкритичної екстракції цієї прянощі досліджена різними авторами більш поглиблено, ніж екстракція коріандру.

Дослідники [27] вивчають вплив температури та тиску на загальний вихід екстракту, не аналізуючи хімічний склад отриманих екстрактів, зокрема, вміст ефірних олій та піперину.

Авторами [28] проводяться дослідження по екстракції чорного перцю в межах тиску 15–30 МПа. Звертає на себе увагу те, що не аналізується співвідношення ефірної фракції та піперину. Дослідники отримують не дуже високий вихід екстрактів (від 1,5 % до 3,0 %), що не може виправдовувати відносно затратний процес надкритичної екстракції цієї сировини.

Дослідники [29] проводять вибір параметрів для отримання різних за співвідношенням компонентів екстрактів. Вивчається також антиоксидантна дія отриманих екстрактів. Нами було вирішено продовжити ці дослідження по вивченню антиоксидантної дії екстрактів чорного перцю у комбінації з екстрактами інших прянощів для застосування у комплексних сумішах для харчових продуктів.

Авторами [30] було проведено дослідження із підбору різних параметрів для отримання екстрактів, насичених терпенами (тобто, основними компонентами ефірних олій, які відповідають за аромат прянощі) та екстрактів із великим вмістом піперамідів (тобто компонентів, які відповідають за характерний гострий та пекучий смак чорного перцю, основним із котрих є піперин). Дослідники, отримуючи екстракти в лабораторній установці, аналізували їх хімічний склад по окремим компонентам, але не вираховували загальний вихід екстрактів по відношенню до сировини, та не аналізували співвідношення піперину та ефірних олій в цих екстрактах, що має практичну значущість при необхідності заміни олеорезинів перцю на CO₂-екстракти. Авторами також не досліджувався вплив ступеню подрібнення перцю на ефективність процесу екстракції. Нами вирішено поглибити ці дослідження у напрямку підбору параметрів для отримання екстрактів із заданим співвідношенням ефірних олій та піперину та отриманню максимального виходу, що буде давати економічний ефект. Наразі нами отримані попередні результати [31]. Отримано максимальний вихід екстракту – 6,5 % та планується визначення фізико-хімічних показників всіх отриманих екстрактів.

Мускатний горіх

Мускатний горіх (*Myristica fragrans*) – це вічнозелене дерево родини мускатових (*Myristicaceae*), що виростає у тропічних районах Південно-Східної Азії. Батьківщиною культури є острови Молуккського архіпелагу (Індонезія). Наразі основними виробниками є Індонезія, Гренада, Індія та Шрі-Ланка.

У харчовій промисловості використовують висушене насіння плоду (мускатний горіх), який вирізняється інтенсивним пряно-солодким ароматом і теплим, дещо пекучим, смаком. Характерні властивості обумовлені вмістом ефірної олії (5–15 %), основними компонентами якої є міристицин, елеміцин, сабінен, пінен та евгенол. Насіння також містить до 30–40 % жирної олії («мускатна олія»), багатої на тригліцериди міристинової та пальмітинової кислот [32, 33].

Для харчової галузі нарівні із олеорезинами [34] мускату використовують ефірну олію, тому що при застосуванні методу гідродистиляції можна отримувати відносно великий вихід із сировини, забезпечуючи цим економічну доцільність процесу переробки. Ефірна олія мускатного горіху, на відміну від олеорезинів, є 100 % натуральним продуктом та має яскраво виражений аромат вихідної прянощі. Але, як було зазначено вище, вплив високої температури в процесі дистиляції може мати негативний вплив на її органолептичні показники. Надкритична CO₂-екстракція проводиться при значно нижчій температурі. При цьому екстрагується, окрім летких фракцій ефірних олій, також жирна олія, таким чином загальний вихід екстракту значно підвищується.

Автори [35, 36] обирають параметри надкритичної екстракції для отримання максимально високого виходу, але ними не аналізується фізико-хімічний склад отриманих екстрактів, вміст ефірних олій та не наводяться приклади їх застосування.

В роботі [37] публікуються досліді по дослідженню впливу методу отримання екстрактів мускатного горіху на органолептичні властивості. Звертає на себе увагу те, що в цьому дослідженні не було помічено різниці в органолептичних властивостях між екстрактами, отриманими за допомогою гідродистиляції та надкритичної CO₂-екстракції, тому нами було вирішено поглибити ці дослідження.

В роботі [38] наводяться моделі для вибору раціональних параметрів екстракції мускатного горіху і ці дослідження заплановано використати в нашій подальшій роботі по надкритичній екстракції цієї прянощі.

Дослідження, проведене авторами [39], було зосереджене на оцінці антиоксидантної активності ефірних олій та нелетких фракцій, одержаних із насіння мускатника (*Myristica fragrans*) та його принасітника (мацису) традиційними методами екстракції. Встановлено, що вищий рівень антиоксидантної активності притаманний нелеткій жирній олії мускату. Однак, слід зазначити, що у вказаній роботі не було проведено детального аналізу внеску окремих біоактивних компонентів у цю загальну активність. Насіння мускатника є джерелом мацелігнану (з вмістом в межах 0,1–1,0 %), який є лігнаном із доведеними антимікробними та антиоксидантними властивостями у харчових системах [40, 41], а також фармакологічною активністю, зокрема протизапальною та протипухлинною дією. Використання надкритичної флюїдної CO₂-екстракції пропонує перспективний підхід для комплексної та селективної переробки мускатного горіху. Цей метод дозволяє фракціонувати сировину, отримуючи окремо леткі фракції, збагачені ефірними компонентами, придатні для ароматизації харчових продуктів та нелеткі жирні олійні фракції з підвищеним вмістом, зокрема, мацелігнану. Екстракти, збагачені мацелігнаном, можуть бути потенційно використані як натуральні антиоксиданти та консерванти в харчовій промисловості. Літературний пошук свідчить про недостатню вивченість або обмеженість опублікованих даних стосовно оптимізації умов CO₂-

екстракції саме для цільового отримання екстрактів з максимальним виходом та концентрацією мацелігану.

Розмарин

Розмарин (*Rosmarinus officinalis* L., нині віднесений до роду *Salvia* родини губоцвітих – *Lamiaceae*) – вічнозелений кущ, поширений у Середземномор'ї. Його назва походить від латинського *ros marinus* – «морська роса», що відображає традиційні місця зростання уздовж морських узбереж. Сьогодні розмарин культивують не лише в Італії, Іспанії, Франції та Греції, а й у багатьох країнах з теплим кліматом, включно з Україною, де він поширюється як пряно-ароматична культура.

Характерний камфороподібний, свіжо-пряний аромат розмарину формується завдяки ефірній олії (1–2,5 %), що містить 1,8-цинеол, камфору, борнеол, α -пінен, камфен та інші терпеноїди. Крім того, листя багате на фенольні сполуки (карнозова кислота, карнозол, розмаринова кислота), що мають антиоксидантні та антимікробні властивості.

У харчовій промисловості листя розмарину застосовується у свіжому та висушеному вигляді або використовуються його екстракти:

як пряність у кулінарії – для м'ясних та рибних страв, соусів, маринадів, овочевих і бобових страв;

як натуральний консервант, що подовжує термін зберігання продуктів завдяки вмісту антиоксидантів;

у виробництві ковбас, паштетів, сирів, хлібобулочних виробів, де він підсилює аромат і пригнічує окисні процеси;

у виробництві харчових олій та жирів як природний стабілізатор проти прогоркання [42–47].

Карнозова кислота, карнозол і розмаринова кислота є малолеткими, мають високу молекулярну масу і руйнуються при нагріванні. Вони не переходять в ефірну олію, тобто їх не можна вилучити методом паро- та гідродистиляції, а можна вилучати методами спиртової, надкритичної CO₂-екстракції та екстракції органічними розчинниками [48].

В результаті проведеного аналізу публікацій виявлено, що існує багато досліджень по отриманню та використанню ефірної олії, олеорезинів та CO₂-екстрактів із розмарину у якості ароматизаторів, натуральних антиоксидантів та консервантів.

Автори [49] провели детальне дослідження впливу параметрів CO₂-екстракції на загальний вихід та, зокрема, на вихід карнозинової кислоти, були проведені дослідження хімічного складу отриманих екстрактів. Інші дослідники [50] займались підбором режимів екстракції та знайшли оптимальні параметри для найбільшого виходу екстракту, який вони називають ефірною олією, та аналізують його хімічний склад. В обох випадках вчені не визначають вміст ефірних олій в отриманих екстрактах, а цей показник впливає на органолептичні властивості продуктів.

Автори [51] порівнюють ефірні олії, отримані різними методами екстракції та вивчають їх хімічний склад та антиоксидантні властивості.

Дослідники [52] провели дослідження по використанню екстрактів із розмарину у якості натуральних антиоксидантів для харчових олій.

Автори [53] отримують вихід CO₂-екстракту – 7,5 % (що є прийнятним для економічної доцільності переробки сировини) та в подальшому очищують його із використанням додаткового розчинника, гексану, для отримання продукту із максимально високим вмістом карнозинової кислоти. Нами було вирішено провести селективну екстракцію із сепараційним розділенням при різних параметрах для отримання екстракту із високим вмістом карнозинової кислоти без додаткової подальшої обробки.

Дослідники [54] зосереджуються на вивченні способів використання CO₂-екстрактів із шроту та інших відходів після первісної екстракції розмарину у якості антиоксидантів та консервантів, що є економічно доцільним. Тому нас зацікавив більш ґрунтовний підхід до проведення експериментів із двохстадійної переробки розмарину: перша стадія – низькі значення тиску та температури для отримання CO₂-екстракту із великим вмістом ефірних олій, який можна використовувати у якості натурального ароматизатора, друга стадія - високі значення тиску та температури, при яких надкритичний вуглекислий газ буде екстрагувати фенольні сполуки розмарину, для отримання CO₂-екстракту із антиоксидантними та антимікробними властивостями. При цьому другий екстракт майже не буде мати характерний аромат розмарину (тому що леткі ароматичні компоненти перейдуть у перший екстракт), і його можна буде використовувати в тих харчових продуктах, де ці органолептичні характеристики є небажаними. Перевагою такої комплексної переробки буде використання однієї сировини для отримання двох різних за властивостями екстрактів, які можуть знайти застосування у різних комплексних сумішах смако-ароматичних та функціональних добавок для харчових продуктів.

Висновки

Проведений аналіз наукових публікацій щодо надкритичної CO₂-екстракції прянощів показав, що більшість досліджень зосереджені на визначенні загального виходу екстрактів та загальному аналізі їхнього складу. При цьому недостатньо вивченими залишаються питання кількісного визначення ефірних олій у CO₂-екстрактах та співвідношення летких і нелетких фракцій, що має ключове значення для практичного використання екстрактів у харчовій галузі як заміників олеорезинів. Саме ця прогалина у наукових розробках обмежує можливість створення стандартизованих за органолептичними характеристиками та функціональністю екстрактів.

Власні експериментальні дослідження з екстракції коріандру підтвердили доцільність такого підходу: отримано екстракт із вмістом ефірних олій 28 % та виходом 9,0 %, що відповідає практичним вимогам і демонструє економічну ефективність процесу надкритичної екстракції. Нами також заплановано подальші дослідження CO₂-екстракції чорного перця і розмарину, спрямовані на отримання екстрактів із контрольованим співвідношенням смако-ароматичних та біологічно активних компонентів.

Таким чином, результати огляду й проведених експериментів свідчать про перспективність розробки підходів до селективної надкритичної CO₂-екстракції із цілеспрямованим регулюванням складу екстрактів. Подальші дослідження в цьому напрямі дадуть можливість розширити застосування натуральних екстрактів у харчовій промисловості, підвищуючи якість, безпечність і стабільність харчових продуктів у порівнянні із використанням традиційних олеорезинів та ефірних олій.

Література

1. Hartmann C., Siegrist M. European consumer healthiness evaluation of “free-from” labelled food products. *Food Quality and Preference*. 2018. Vol. 68. P. 377–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.009>.
2. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry. *Gases in Agro-Food Processes*. Academic Press. 2019. P. 483–509. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812465-9.00020-7>.
3. Manzoor S. Advantages of essential oil extraction using supercritical fluid: process optimization and effect of processing parameters. *Essential Oils: Extraction Methods and Applications*. 2023. P. 685–705. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119829614.ch31>.
4. Brunner G. Supercritical fluids: technology and application to food processing. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 67. No. 1–2. P. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.060>.
5. Nayik G. A., Gull A., Ganaie T. A. Handbook of Oleoresins: Extraction, Characterization, and Applications. Boca Raton. CRC Press. 2022.
6. Capuzzo A., Maffei M. E., Occhipinti A. Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*. 2013. Vol. 18. No. 6. P. 7194–7238. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules18067194>.
7. Patil M. A. Supercritical fluid technology: recent trends in food processing. *Advances in Food Process Engineering*. 2023. P. 25–44.
8. Iras A. Comparative evaluation of vegetable oils obtained by supercritical extraction and conventional techniques. *International Journal of Food Science and Technology*. 2021. Vol. 56. No. 9. P. 4496–4505. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15098>.
9. Modupalli N., Natarajan V. Application of supercritical fluid extraction in spices. *Applications of Supercritical Fluid Extraction in Food Processing*. Apple Academic Press. 2025. P. 175–195.
10. ДСТУ ISO/TR 210:2006. Олії ефірні. Настанови щодо пакування, кондиціонування та зберігання. Київ. Держспоживстандарт України.
11. ДСТУ ISO 6571:2014. Прянощі, приправи і трави. Визначення вмісту ефірної олії. Київ. ДП «УкрНДНЦ».
12. ISO 6571:2008. Spices, condiments and herbs. Determination of volatile oil content. Geneva. International Organization for Standardization. 2008.
13. Князюк О. В., Князюк Р. А. Особливості росту та продуктивність коріандру посівного залежно від строків сівби. *Агробіологія*. 2016. № 2. С. 104–108.
14. Zambelli R. A. Chemical, functional and nutritional properties of coriander. *The Chemistry Inside Spices and Herbs*. Bentham Science Publishers. 2024. P. 19–43. DOI: <https://doi.org/10.2174/97898151968321240401>.
15. Silva F., Domeño C., Domingues F. C. Coriandrum sativum L.: characterization and applications. *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Academic Press. 2020. P. 497–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818553-7.00035-8>.
16. Ramadan M. F., ed. Handbook of Coriander (Coriandrum sativum). Boca Raton. CRC Press. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003204626>
17. Zeković Z., Bera O., Đurović S., Pavlić B. Supercritical fluid extraction of coriander seeds. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. Vol. 125. P. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.02.006>.

18. Mhemdi H., Rodier É., Kechaou N., Fages J. Selective extraction of fats and essential oil from coriander seeds. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 105. No. 4. P. 609–616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.030>.
19. Zeković Z., Pavlić B., Cvetanović A., Đurović S. Supercritical extraction of coriander seeds. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 94. P. 353–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.008>.
20. Grosso C. Supercritical CO₂ extraction of volatile oil from coriander seeds. *Food Chemistry*. 2008. Vol. 111. No. 1. P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.03>.
21. Geed S. R., Singh R. P., Rai B. N. Recent development of extraction processes of coriander oil. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2014. Vol. 6.
22. Dima C. Supercritical CO₂ extraction of *Coriandrum sativum* L. essential oil. *Journal of Food Process Engineering*. 2015. Vol. 39. No. 2. P. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12218>.
23. Shrirame B. S. Optimization of supercritical extraction of coriander seed. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2018. Vol. 21. No. 2. P. 330–344. DOI: <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1470943>.
24. Гетьман П. В., Півень О. М. Технологія CO₂-екстракції насіння коріандру. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2025. № 2. С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.10>.
25. Wulandari W. Black pepper (*Piper nigrum* L.): botanical aspects and activities. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine*. 2021.
26. Milenković A. N., Stanojević L. P. Black pepper: chemical composition and activities. *Advanced Technologies*. 2021. Vol. 10. No. 2. P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.5937/savteh2102040M>.
27. Perakis C., Louli V., Magoulas K. Supercritical fluid extraction of black pepper oil. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 71. No. 4. P. 386–393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.049>.
28. Andrade K. S., Trivellin G., Ferreira S. R. S. Piperine-rich extracts obtained by high-pressure methods. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. Vol. 128. P. 370–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.05.001>.
29. Dang Q. T., Phan N. N. Optimization of supercritical CO₂ extraction of black pepper oleoresin. *International Food Research Journal*. 2014. Vol. 21. No. 4.
30. Luca S. V. Supercritical CO₂ extraction of spices. *Food Chemistry*. 2023. Vol. 406. Article 135090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135090>.
31. Getman P. V., Piven O. M. Development of technology for supercritical CO₂ extract of black pepper. *MicroCAD-2025*. Харків. НТУ «ХПІ». 2025. С. 674.
32. Verma N. K., Singh A. K., Maurya A. *Myristica fragrans*: a brief review. *EAS Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2021. Vol. 3. No. 5. P. 133–137. DOI: <https://doi.org/10.36349/easjpp.2021.v03i05.004>.
33. Shah M., Dave K., George I. A. Nutmeg seeds. *Medicinal Spice and Condiment Crops*. CRC Press. 2024. P. 325–345.
34. Ali T. M., Butt N. A., Shaikh M. Characterization and extraction techniques of nutmeg oleoresin. *Handbook of Oleoresins*. CRC Press. 2022. P. 187–233.
35. Al-Rawi S. S. Comparison of yields and quality of nutmeg butter. *Journal of Food Engineering*. 2013. Vol. 119. No. 3. P. 595–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.029>.

36. Syukri D. Characterization of nutmeg essential oil by different extraction methods. *ISOTOBAT* 2025. 2025.
37. Chatterjee S., Gupta S., Variyar P. S. Comparison of essential oils of nutmeg. *Natural Product Communications*. 2015. Vol. 10. No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1177/1934578X1501000833>.
38. Machmudah S. Supercritical CO₂ extraction of nutmeg oil. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2006. Vol. 39. No. 1. P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.01.007>.
39. Sheikh S. A. Antioxidant potential of nutmeg oils. *Journal of Food Science and Technology*. 2025.
40. Malik T. Nutmeg nutraceutical constituents. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. Vol. 46. No. 6. Article e15848. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15848>.
41. Tariq D. Nutmeg beyond spice. *Food Science and Nutrition*. 2025. Vol. 13. No. 10. Article e71053. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.71053>.
42. Aziz E. Rosemary species: phytochemicals and applications. *South African Journal of Botany*. 2022. Vol. 151. P. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.026>.
43. De Macedo L. M. Rosemary and its topical applications. *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 5. Article 651. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9050651>.
44. Hammer M., Junghanns W. *Rosmarinus officinalis* L. *Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants*. Springer. 2020. P. 501–521. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1_15.
45. Nieto G., Ros G., Castillo J. Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary. *Medicines*. 2018. Vol. 5. No. 3. Article 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicines5030098>.
46. Sasikumar B. Rosemary. *Handbook of Herbs and Spices*. Woodhead Publishing. 2012. P. 452–468. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095671.452>.
47. Sánchez-Camargo A. P., Herrero M. Rosemary as a functional ingredient. *Current Opinion in Food Science*. 2017. Vol. 14. P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.12.003>.
48. Wollinger A. Antioxidant activity of rosemary distillation residues. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19. No. 6. P. 754–765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.014>.
49. Carvalho R. N. Jr. Supercritical fluid extraction from rosemary. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2005. Vol. 35. No. 3. P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2005.01.009>.
50. Zermane A. Optimization of rosemary essential oil extraction. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19. No. 4. P. 538–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.08.011>.
51. Larkeche O. Optimization of hydrodistillation of rosemary oil. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.4018/IJEOE.2020070104>.
52. Vicente G. Supercritical CO₂ extraction of antioxidants from rosemary. *Journal of Oleo Science*. 2012. Vol. 61. No. 12. P. 689–697. DOI: <https://doi.org/10.5650/jos.61.689>.
53. Manikyam H. K., Dhanaseelan J., Mani J. Supercritical CO₂ extraction of carnosic acid from rosemary. *Chemical Science International Journal*. 2024. Vol. 33. No. 6. P. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.9734/CSJI/2024/v33i6920>.
54. Luca S. V. Value-added compounds from rosemary by-products. *Antioxidants*. 2023. Vol. 12. No. 2. Article 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12020244>.

Bibliography (transliterated)

1. Hartmann C., Siegrist M. European consumer healthiness evaluation of “free-from” labelled food products. *Food Quality and Preference*. 2018. Vol. 68. P. 377–388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.009>.
2. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry. *Gases in Agro-Food Processes*. Academic Press. 2019. P. 483–509. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812465-9.00020-7>.
3. Manzoor S. Advantages of essential oil extraction using supercritical fluid: process optimization and effect of processing parameters. *Essential Oils: Extraction Methods and Applications*. 2023. P. 685–705. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119829614.ch31>.
4. Brunner G. Supercritical fluids: technology and application to food processing. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 67. No. 1–2. P. 21–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.060>.
5. Nayik G. A., Gull A., Ganaie T. A. Handbook of Oleoresins: Extraction, Characterization, and Applications. Boca Raton. CRC Press. 2022.
6. Capuzzo A., Maffei M. E., Occhipinti A. Supercritical fluid extraction of plant flavors and fragrances. *Molecules*. 2013. Vol. 18. No. 6. P. 7194–7238. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules18067194>.
7. Patil M. A. Supercritical fluid technology: recent trends in food processing. *Advances in Food Process Engineering*. 2023. P. 25–44.
8. Iras A. Comparative evaluation of vegetable oils obtained by supercritical extraction and conventional techniques. *International Journal of Food Science and Technology*. 2021. Vol. 56. No. 9. P. 4496–4505. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15098>.
9. Modupalli N., Natarajan V. Application of supercritical fluid extraction in spices. *Applications of Supercritical Fluid Extraction in Food Processing*. Apple Academic Press. 2025. P. 175–195.
10. DSTU ISO/TR 210:2006. Olii efirni. Nastanovy shchodo pakuvannia, kondytsiuivannia ta zberihannia. Kyiv. Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
11. DSTU ISO 6571:2014. Prianoshchi, prypravy i travy. Vyznachennia vmistu efirnoi olii. Kyiv. DP «UkrNDNTs».
12. ISO 6571:2008. Spices, condiments and herbs. Determination of volatile oil content. Geneva. International Organization for Standardization. 2008.
13. Kniaziuk O. V., Kniaziuk R. A. Osoblyvosti rostu ta produktyvnist koriandru posivnogo zalezno vid strokiv sivby. *Ahrobiolohiia*. 2016. No. 2. P. 104–108.
14. Zambelli R. A. Chemical, functional and nutritional properties of coriander. *The Chemistry Inside Spices and Herbs*. Bentham Science Publishers. 2024. P. 19–43. DOI: <https://doi.org/10.2174/97898151968321240401>.
15. Silva F., Domeño C., Domingues F. C. Coriandrum sativum L.: characterization and applications. *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. Academic Press. 2020. P. 497–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818553-7.00035-8>.
16. Ramadan M. F., ed. Handbook of Coriander (Coriandrum sativum). Boca Raton. CRC Press. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003204626>.
17. Zeković Z., Bera O., Đurović S., Pavlić B. Supercritical fluid extraction of coriander seeds. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. Vol. 125. P. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.02.006>.

18. Mhemdi H., Rodier É., Kechaou N., Fages J. Selective extraction of fats and essential oil from coriander seeds. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 105. No. 4. P. 609–616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.03.030>.
19. Zeković Z., Pavlić B., Cvetanović A., Đurović S. Supercritical extraction of coriander seeds. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 94. P. 353–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.008>.
20. Grosso C. Supercritical CO₂ extraction of volatile oil from coriander seeds. *Food Chemistry*. 2008. Vol. 111. No. 1. P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.03.03>.
21. Geed S. R., Singh R. P., Rai B. N. Recent development of extraction processes of coriander oil. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2014. Vol. 6.
22. Dima C. Supercritical CO₂ extraction of *Coriandrum sativum* L. essential oil. *Journal of Food Process Engineering*. 2015. Vol. 39. No. 2. P. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12218>.
23. Shrirame B. S. Optimization of supercritical extraction of coriander seed. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 2018. Vol. 21. No. 2. P. 330–344. DOI: <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1470943>.
24. Гетьман П. В., Півень О. М. Технологія СО₂-екстракції насіння коріандру. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях*. 2025. № 2. С. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.02.10>.
25. Wulandari W. Black pepper (*Piper nigrum* L.): botanical aspects and activities. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Medicine*. 2021.
26. Milenković A. N., Stanojević L. P. Black pepper: chemical composition and activities. *Advanced Technologies*. 2021. Vol. 10. No. 2. P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.5937/savteh2102040M>.
27. Perakis C., Louli V., Magoulas K. Supercritical fluid extraction of black pepper oil. *Journal of Food Engineering*. 2005. Vol. 71. No. 4. P. 386–393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.10.049>.
28. Andrade K. S., Trivellin G., Ferreira S. R. S. Piperine-rich extracts obtained by high-pressure methods. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. Vol. 128. P. 370–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.05.001>.
29. Dang Q. T., Phan N. N. Optimization of supercritical CO₂ extraction of black pepper oleoresin. *International Food Research Journal*. 2014. Vol. 21. No. 4.
30. Luca S. V. Supercritical CO₂ extraction of spices. *Food Chemistry*. 2023. Vol. 406. Article 135090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135090>.
31. Getman P. V., Piven O. M. Development of technology for supercritical CO₂ extract of black pepper. *MicroCAD-2025*. Харків. НТУ «ХПІ». 2025. С. 674.
32. Verma N. K., Singh A. K., Maurya A. *Myristica fragrans*: a brief review. *EAS Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2021. Vol. 3. No. 5. P. 133–137. DOI: <https://doi.org/10.36349/easjpp.2021.v03i05.004>.
33. Shah M., Dave K., George I. A. Nutmeg seeds. *Medicinal Spice and Condiment Crops*. CRC Press. 2024. P. 325–345.
34. Ali T. M., Butt N. A., Shaikh M. Characterization and extraction techniques of nutmeg oleoresin. *Handbook of Oleoresins*. CRC Press. 2022. P. 187–233.
35. Al-Rawi S. S. Comparison of yields and quality of nutmeg butter. *Journal of Food Engineering*. 2013. Vol. 119. No. 3. P. 595–601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.029>.

36. Syukri D. Characterization of nutmeg essential oil by different extraction methods. *ISOTOBAT* 2025. 2025.
37. Chatterjee S., Gupta S., Variyar P. S. Comparison of essential oils of nutmeg. *Natural Product Communications*. 2015. Vol. 10. No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1177/1934578X1501000833>.
38. Machmudah S. Supercritical CO₂ extraction of nutmeg oil. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2006. Vol. 39. No. 1. P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.01.007>.
39. Sheikh S. A. Antioxidant potential of nutmeg oils. *Journal of Food Science and Technology*. 2025.
40. Malik T. Nutmeg nutraceutical constituents. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. Vol. 46. No. 6. Article e15848. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.15848>.
41. Tariq D. Nutmeg beyond spice. *Food Science and Nutrition*. 2025. Vol. 13. No. 10. Article e71053. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.71053>.
42. Aziz E. Rosemary species: phytochemicals and applications. *South African Journal of Botany*. 2022. Vol. 151. P. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.026>.
43. De Macedo L. M. Rosemary and its topical applications. *Plants*. 2020. Vol. 9. No. 5. Article 651. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9050651>.
44. Hammer M., Junghanns W. *Rosmarinus officinalis* L. *Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants*. Springer. 2020. P. 501–521. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1_15.
45. Nieto G., Ros G., Castillo J. Antioxidant and antimicrobial properties of rosemary. *Medicines*. 2018. Vol. 5. No. 3. Article 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicines5030098>.
46. Sasikumar B. Rosemary. *Handbook of Herbs and Spices*. Woodhead Publishing. 2012. P. 452–468. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095671.452>.
47. Sánchez-Camargo A. P., Herrero M. Rosemary as a functional ingredient. *Current Opinion in Food Science*. 2017. Vol. 14. P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2016.12.003>.
48. Wollinger A. Antioxidant activity of rosemary distillation residues. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19. No. 6. P. 754–765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.014>.
49. Carvalho R. N. Jr. Supercritical fluid extraction from rosemary. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2005. Vol. 35. No. 3. P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2005.01.009>.
50. Zermane A. Optimization of rosemary essential oil extraction. *Comptes Rendus Chimie*. 2016. Vol. 19. No. 4. P. 538–543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.08.011>.
51. Larkeche O. Optimization of hydrodistillation of rosemary oil. *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2020. Vol. 9. No. 3. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.4018/IJEOE.2020070104>.
52. Vicente G. Supercritical CO₂ extraction of antioxidants from rosemary. *Journal of Oleo Science*. 2012. Vol. 61. No. 12. P. 689–697. DOI: <https://doi.org/10.5650/jos.61.689>.
53. Manikyam H. K., Dhanaseelan J., Mani J. Supercritical CO₂ extraction of carnosic acid from rosemary. *Chemical Science International Journal*. 2024. Vol. 33. No. 6. P. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.9734/CSJI/2024/v33i6920>.
54. Luca S. V. Value-added compounds from rosemary by-products. *Antioxidants*. 2023. Vol. 12. No. 2. Article 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12020244>.

УДК 665.5.06

П. В. Гетьман, аспірант, О. М. Півень, канд. техн. наук, доцент

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ НАДКРИТИЧНОЇ СО₂-ЕКСТРАКЦІЇ ПРЯНОЩІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У представленій оглядовій статті проведено системний аналіз сучасного стану та перспектив застосування технології надкритичної СО₂-екстракції для отримання екстрактів із пряно-ароматичної сировини з метою використання їх у харчовій промисловості. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням споживчого попиту на харчові продукти з натуральним складом («clean label»), що вимагає від виробників повної відмови від традиційних олеорезинів, отриманих за допомогою синтетичних органічних розчинників. У роботі детально розглянуто фізико-хімічні основи флюїдної екстракції діоксидом вуглецю, яка поєднує високу селективність, енергоефективність та можливість збереження термолабільних біологічно активних сполук у їхньому нативному стані.

Проведено критичний порівняльний аналіз трьох основних видів екстрактів: олеорезинів, ефірних олій та надкритичних СО₂-екстрактів. Авторами виділено ключові переваги СО₂-технології, зокрема відсутність окисних процесів, мікробіологічну чистоту кінцевого продукту та шроту, можливість гнучкого регулювання властивостей екстрагента шляхом зміни параметрів тиску та температури. В ході аналізу встановлено, що більшість існуючих наукових праць фокусуються на максимізації загального виходу екстракту, тоді як питання цілеспрямованого отримання продуктів із заданим співвідношенням летких (ароматичних) та нелетких (смакових) фракцій залишається недостатньо вивченим.

В огляді деталізовано специфіку надкритичної переробки таких розповсюджених прянощів, як коріандр, чорний перець, мускатний горіх та розмарин. Зокрема, обґрунтовано необхідність контролю вмісту ліналоолу в коріандрі, піперину в чорному перці, мацелігану в мускатному горіху та фенольних дитерпенів (карнозової кислоти та карнозолу) у розмарині. Особливу увагу приділено проблемі відсутності єдиних галузевих стандартів для кількісного визначення ефірних олій у складі СО₂-екстрактів, що ускладнює їхню стандартизацію під час розробки рецептур комплексних смакоароматичних сумішей для м'ясної та кондитерської галузей.

Наукова новизна роботи підкріплена посиланням на результати власних експериментальних досліджень авторів, у яких продемонстровано можливість отримання екстракту коріандру з виходом 9,0 % та вмістом ефірних олій на рівні 28 %, що за фізико-хімічними показниками ідентично олеорезину, але перевершує його за чистотою та безпечністю. Запропоновано концепцію двостадійної селективної екстракції, яка дозволяє з однієї заправки сировини отримувати окремо фракції ароматизаторів та натуральних антиоксидантів. Практичне значення огляду полягає у формуванні наукового підґрунтя для заміни синтетичних добавок натуральними аналогами, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної харчової продукції на міжнародному ринку.

Ключові слова: надкритична екстракція, вуглекислота, ефірні олії, натуральний продукт, прянощі, екстракт, коріандр, чорний перець, мускат, розмарин.

P. V. Hetman, O. M. Piven

EFFICIENCY OF SUPERCRITICAL CO₂ EXTRACTION OF SPICES FOR USE IN THE FOOD INDUSTRY

The presented review article provides a systematic analysis of the current state and prospects for applying supercritical CO₂ extraction technology to obtain extracts from spices raw materials for use in the food industry. The relevance of the study is driven by the rapid growth in consumer demand for food products with a natural composition ("clean label"), which requires manufacturers to completely abandon traditional oleoresins obtained using synthetic organic solvents. The paper considers in detail the physicochemical principles of fluid extraction with carbon dioxide, which combines high selectivity, energy efficiency, and the ability to preserve thermolabile biologically active compounds in their native state.

A critical comparative analysis of the three main types of extracts-oleoresins, essential oils, and supercritical CO₂ extracts-was conducted. The authors highlight the key advantages of CO₂ technology, including the absence of oxidative processes, the microbiological purity of the final product and the meal, and the possibility of flexible regulation of extractant properties by changing pressure and temperature parameters. The analysis established that most existing scientific works focus on maximizing the total extract yield, while the issue of purposeful production of products with a specified ratio of volatile (flavour) and non-volatile (taste) fractions remains insufficiently studied.

The review details the specifics of supercritical processing of common spices such as coriander, black pepper, nutmeg, and rosemary. In particular, it substantiates the need to control the content of linalool in coriander, piperine in black pepper, macelignan in nutmeg, and phenolic diterpenes (carnosic acid and carnosol) in rosemary. Special attention is paid to the problem of the lack of uniform industry standards for the quantitative determination of essential oils within CO₂ extracts, which complicates their standardization during the development of formulations for complex flavor and aroma mixtures in the meat and confectionery industries.

The scientific novelty of the work is supported by references to the results of the authors' own experimental studies, which demonstrated the possibility of obtaining coriander extract with a yield of 9.0 % and an essential oil content of 28 %. This extract is identical to oleoresin in terms of physicochemical characteristics but exceeds it in purity and safety. The concept of two-stage selective extraction is proposed, which allows for the separate recovery of flavoring fractions and natural antioxidants from a single raw material load. The practical significance of the review lies in forming a scientific basis for replacing synthetic additives with natural analogs, which will increase the competitiveness of domestic food products in the international market.

Keywords: supercritical extraction, carbon dioxide, essential oils, natural product, spices, extract, coriander, black pepper, nutmeg, rosemary.

Отримано редколегією 07.01.2026

Гетьман Павло Володимирович (Pavlo Hetman), аспірант Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", <https://orcid.org/0009-0002-8597-9934>;

Півень Олена Миколаївна (Olena Piven), канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", <https://orcid.org/0000-0002-6987-1504>.