

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-26>

УДК 621.646

І. М. Белова¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-1497-7133

В. М. Гіджеліцький², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5959-514X

І. Я. Стадник³, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0003-4126-3256

¹ Інститут інноватики, природокористування та інфраструктури

Західноукраїнського національного університету

² Київський кооперативний інститут бізнесу і права³ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

e-mail: igorstadnykk@gmail.com

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ЕКСТРАГУВАННЯ ЧОРНОБРИВЦІВ У РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

Анотація. У статті досліджено процес інтенсифікації екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобрівців (*Tagetes patula*) у роторно-пульсаційному апараті (РПА) циліндричного типу з гвинтовим ротором. Науково обґрунтовано застосування принципу дискретного введення енергії для підвищення швидкості масообміну. На основі аналізу рівняння руху дисперсної частки визначено роль сил інерції приєднаної маси та гідродинамічного опору в руйнуванні прикордонного дифузійного шару. Установлено, що конструктивні особливості апарата забезпечують високу відносну швидкість фаз, що дає змогу скоротити тривалість екстракції в кілька разів порівняно з традиційними методами, забезпечуючи високий вихід цільових компонентів при оптимальних енерговитратах.

Ключові слова: чорнобрівці, екстрагування, роторно-пульсаційний апарат, дискретне введення енергії, приєднана маса, відносна швидкість, інтенсифікація масообміну.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку промисловості України створення енерго- та ресурсозберігаючих технологій є пріоритетним завданням. Покращення техніко-економічних показників виробництва в харчовій, фармацевтичній і хімічній галузях безпосередньо залежить від розробки високоефективних апаратів, здатних інтенсифікувати фундаментальні гідродинамічні й тепломасообмінні процеси. Одним із найбільш критичних етапів у переробці рослинної сировини є екстрагування цінних компонентів, швидкість якого суттєво обмежена складною внутрішньою структурою біологічних об'єктів.

Сучасні методи інтенсифікації екстракції базуються на застосуванні імпульсних, вібраційних і кавітаційних впливів. Вибір оптимального способу підведення енергії (механічного, акустичного або їх поєднання) визначається специфікою сировини. З огляду на обмежене поширення електричних і теплових методів диспергування, особливу увагу привертають механічні й гідроакустичні способи впливу, що забезпечують високий ККД та зниження собівартості продукції.

При використанні традиційного механічного перемішування ключовим фактором інтенсифікації стає неоднорідність енергетичного поля в об'ємі апарата. Максимальна інтенсивність перенесення речовини спостерігається лише в локальній активній зоні, де турбулентність і градієнти швидкостей досягають пікових значень. Для такої специфічної сировини, як суцвіття чорнобрівців, де пелюстки мають високий внутрішній дифузійний опір, критично важливо забезпечити умови для багаторазової рециркуляції часток через зони високої енергоємності. Крім цього, додержання постійного оновлення граничного шару розчинника на міжфазній поверхні за рахунок підтримання високого рушійного потенціалу масопереносу в усьому об'ємі екстрактора.



Таким чином, наукове обґрунтування шляхів посилення динамічного імпульсного впливу в активних зонах при мінімізації загальних енерговитрат є ключем до створення високоефективного обладнання для переробки чорнобривців.

Аналіз останніх досліджень. Традиційні підходи до інтенсифікації масообмінних процесів у системі «тверде тіло – рідина» базуються на механічному підведенні енергії за допомогою перемішувальних пристроїв різних конструкцій: лопатевих, пропелерних, турбінних і вібраційних [1–3]. Згідно з фундаментальними дослідженнями [4], основний механізм впливу мішалок полягає у створенні тангенціальних, радіальних або осьових потоків, що забезпечують макроперемішування об'єму. Проте при відносно низьких швидкостях навколо рослинної частки формується ламінарний пристінний шар, товщина якого обмежує швидкість дифузії. Лише за умови значного зростання відносної швидкості відбувається перехід до турбулентного режиму, що супроводжується зростанням зсувних напружень і деформацією міжфазної поверхні.

Незважаючи на різноманітність конструкцій, використання класичних проточних апаратів для екстракції біологічної сировини часто є малоефективним. Це пояснюється суттєвою різницею у швидкостях процесів: механічне руйнування часток відбувається майже миттєво, тоді як дифузійний вихід вторинних метаболітів (зокрема лютеїну й ефірних олій чорнобривців) є тривалим процесом [5]. Сучасні світові тенденції (2023–2025 роки) у галузі переробки рослинної сировини, зокрема чорнобривців (*Tagetes erecta* та *Tagetes patula*), демонструють перехід від традиційної мацерації до високоенергетичних методів.

Сучасний стан досліджень у галузі екстрагування вказує на необхідність переходу від загального перемішування до створення локальних мікроактивних зон. Роботи 2024–2025 років активно розглядають ультразвукову екстракцію (UAE) та мікрохвильовий вплив як засоби руйнування клітинних стінок [6; 7]. Проте встановлено, що для промислових масштабів ці методи часто потребують значних витрат енергії або викликають локальний перегрів, що критично для термолабільних каротиноїдів (лютеїну) [8].

Новітні дослідження (2025 рік) указують на те, що створення «мікроактивних зон» навколо кожної частинки квітки є більш енергоефективним, ніж обертання всього об'єму рідини [9]. Подача енергії у формі потужних короткочасних імпульсів дає змогу досягти пікової питомої потужності безпосередньо в місці контакту фаз.

Аналіз публікацій 2024 року підтверджує, що ключовим фактором подолання дифузійного бар'єру є створення відносної швидкості (w_0). У стаціонарних потоках частки чорнобривців швидко набувають швидкості середовища, що мінімізує масообмін. У стаціонарних потоках швидкість часток (v_d) швидко зрівнюється зі швидкістю середовища (v_c), що призводить до занулення відносної швидкості ($w = 0$). У такому стані масообмін лімітується виключно молекулярною дифузією, що критично сповільнює процес.

Доцільним є перехід від постійного введення енергії до імпульсного впливу. Потужні короткочасні імпульси створюють різкі перепади тиску, що дають змогу буквально «виштовхувати» екстрактивні речовини з капілярів рослинної тканини, запобігаючи при цьому термічній деградації чутливих сполук. Тому для інтенсифікації процесу необхідно забезпечити рух екстрагенту з прискоренням ($g_c = dv_c/dt \neq 0$). Це дає можливість динамічно «зривати» насичений прикордонний шар із поверхні кожної пелюстки чорнобривців.

Кінетична модель процесу в сучасних апаратах описується рівнянням масопереносу [10; 11]:

$$M = kS\Delta U, \quad (1)$$

де інтенсифікація досягається синергією збільшення питомої поверхні (S) і коефіцієнта переносу (k). Використання роторно-пульсаційних систем дає змогу реалізувати ці умови одночасно. Коли період силового впливу на систему є спільномірним із часом релаксації часток,



процес переходить із пасивної дифузії в режим активної конвекції на мікрорівні [9; 12]. Аналіз літератури показує, що найбільш перспективним шляхом підвищення k є використання масових сил (відцентрових або вібраційних). Оскільки густина чорнобривців і розчинника відрізняється, виникає інерційний ефект, який підтримує високе значення w навіть у турбулентних середовищах [9–11; 13].

Незважаючи на значний прогрес, залишається недостатньо вивченим питання оптимальної конфігурації роторних вузлів для обробки суцвіть чорнобривців, які мають складну парусну геометрію пелюсток. Це зумовлює необхідність дослідження роторно-пульсаційних апаратів із гвинтовими пазами, які здатні поєднувати транспортувальну функцію з інтенсивним імпульсним впливом.

Максимальна інтенсифікація екстрагування досягається за умови, коли період силового впливу на систему є спільномірним із часом релаксації часток. Це дає змогу трансформувати процес із пасивної дифузії в режим активної мікроконвекції. Саме такий режим реалізується в роторно-пульсаційних апаратах, що й визначило напрям дослідження.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою роботи є наукове обґрунтування й експериментальне підтвердження ефективності процесу екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті на основі принципу дискретного введення енергії.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати гідродинамічні умови в робочій зоні РПА й установити вплив сил інерції приєднаної маси на інтенсифікацію масопереносу.
2. Розробити математичну модель руху рослинної частки в потоці екстрагенту з урахуванням конструктивних особливостей гвинтового ротора.
3. Експериментально встановити залежність виходу цільових компонентів від режимних параметрів апарата (частоти обертання ротора й тривалості обробки).
4. Порівняти ефективність запропонованого методу з традиційними способами екстрагування за кінетичними й енергетичними показниками.

Основна частина. Об'єктом дослідження слугували висушені суцвіття чорнобривців (*Tagetes patula*), заготовлені в період повного розквіту. Перед екстрагуванням суцвіття надавали попередньому подрібненню до фракції розміром $d = 2\text{--}5$ мм. Вологість сировини становила не більше ніж 10–12 %. Екстрагент: етиловий спирт 70 %. Співвідношення твердої та рідкої фаз (Т:Р) у дослідах варіювалося в межах від 1:5 до 1:15.

Дослідження проводилися на лабораторній установці, ключовим вузлом якої є роторно-пульсаційний апарат (далі – РПА) циліндричного типу. Ротор: діаметр 200 мм, оснащений гвинтовими пазами для створення осьового прискорення. Нерухома циліндрична решітка з отворами діаметром 2–3 мм. Електродвигун із частотним регулятором, що давав змогу змінювати швидкість обертання ротора в діапазоні від 500 до 3000 об/хв.

Методика проведення екстракції. Процес екстрагування здійснювався за циркуляційною схемою: задана кількість екстрагенту заливалася в робочу ємність і підігрівалася до температури 40–60 °С. Після досягнення температурного режиму в систему вносилися наважка чорнобривців. Включався РПА, що забезпечував інтенсивне перемішування та дискретне введення енергії згідно з описаною теоретичною моделлю. Через рівні проміжки часу (5, 10, 20, 30 хв) відбиралися проби екстракту для визначення вмісту цільових компонентів.

Аналітичні методи. Визначення вмісту сухих речовин в екстракті визначали рефрактометричним методом. Уміст каротиноїдів (лютеїну) вимірювали спектрофотометричним методом при довжині хвилі 450 нм. Математична обробка даних проводилася з використанням методів варіаційної статистики (програмний пакет Excel/Origin), з довірчою ймовірністю $P = 0,95$.

Математичне моделювання динаміки часток чорнобривців у потоці екстрагенту. Швидкість екстракції в РПА описується залежністю, де коефіцієнт переносу k є функцією від критерію Рейнольдса (Re), який, у свою чергу, прямо залежить від частоти обертання ротора та геометрії гвинтових пазів. Для опису інтенсифікації масообміну в роторно-пульсаційному апараті розглянули рівняння руху окремої частки рослинної сировини. Зміна швидкості частки v_d визначається балансом сил [14; 16]:

$$m_d \cdot \frac{dv_d}{dt} = F + F_m + F_g, \quad (2)$$

де ключову роль для нашого апарата відіграють сила інерції приєднаної маси (F_m) і сила гідродинамічного опору (F). Оскільки ми використовуємо ротор із гвинтовими пазами, він створює різкі прискорення потоку. Частка чорнобривця змушена затягувати за собою екстрагент. Для складної форми пелюсток коефіцієнт k_m буде значно вищим за 0,5 (сферичне значення), що збільшує динамічний вплив на клітинну оболонку. Сила гідродинамічного опору (F) залежить від квадрата відносної швидкості w^2 . У нашому РПА завдяки вузькому зазору між ротором і решіткою w досягає максимальних значень, що призводить до здирання дифузійного шару з поверхні квітки.

У процесі екстрагування чорнобривців на кожну частинку в потоці діє комплекс сил, що визначає її траєкторію та швидкість омивання розчинником. Сила інерції приєднаної маси – F_{add} або F_m . Найважливіша сила – в умовах пульсацій, що створюються гвинтовим ротором. Коли ротор проганяє суміш крізь отвори, швидкість рідкої фази (v_c) змінюється стрибкоподібно. Частинка чорнобривця не може миттєво змінити свою швидкість через інерцію, але вона «тягне» за собою певний об'єм рідини – приєднану масу (m_{add}).

$$F_{add} = m_{add} dw/dt. \quad (3)$$

Оскільки швидкість у пазах ротора змінюється за мілісекунди, похідна dw/dt набуває величезних значень. Це створює динамічний удар, який не просто перемішує, а буквально «стискає та розтискає» капіляри пелюсток чорнобривців, прискорюючи вихід лютеїну. Складова сили гравітації й Архімеда (F_{gx}) враховує різницю густин між рослинною тканиною та екстрагентом. Відповідно:

$$F_{gx} = V_d(p_d - p_c)g_x. \quad (4)$$

У звичайному відстійнику пелюстки чорнобривців можуть спливати або осідати (залежно від розчинника). У нашому апараті, де діють високі прискорення, ця сила врівноважується турбулентними пульсаціями. Однак велика різниця густин ($p_d - p_c$) сприяє тому, що частка «відстає» від потоку, збільшуючи відносну швидкість w .

Сила гідродинамічного опору (F) – це сила безпосереднього «тертя» розчинника об поверхню квітки. Оскільки використовується ротор із гвинтовими пазами, потік набуває складного закрученого характеру. Сила опору, що залежить від площі міделевого перерізу (S_m), у випадку пелюсток чорнобривців є дуже значною через їхню неправильну, «парусоподібну» форму. Високий опір призводить до інтенсивного відведення дифузійного шару. Щойно молекула цільової речовини виходить із пори рослини, сила F миттєво «змиває» її в загальний об'єм екстрагенту.

Підставляючи значення сил у загальне рівняння руху, ми отримуємо диференціальну модель, яка пояснює переваги вибраного методу. Гвинтові пази ротора створюють постійну зміну швидкості v_c . Відповідно, це генерує силу F_m , яка пропорційна прискоренню dw/dt . Це означає, що кожна пульсація в апараті створює миттєвий стрибок тиску всередині капілярів чорнобривців. Циліндрична решітка виступає як турбулізатор. Коли частка проходить крізь отвори решітки, коефіцієнт опору $\varnothing$ різко зростає через зміну числа Рейнольдса.

Якщо підставити всі розписані нами складові, ми отримуємо повну картину:

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3 \rho_c}{3 \rho_d} \frac{\varnothing}{R} \omega^2 + \frac{1}{2} \frac{\rho_c}{\rho_d} \frac{d\omega}{dt} + g \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_d} \right). \quad (5)$$

Ця формула (5) доводить, що зміна швидкості частинки (dv_d/dt) впливає на швидкість екстракції. У апараті регулюється трьома важелями: розміром часток чорнобривців, що прямо впливає на градієнт швидкості (dw/dt) та конструкцією пазів. Вони визначають коефіцієнт опору ($\varnothing$).

Вплив динамічних параметрів на інтенсивність масопереносу.

Для опису процесу екстрагування ми використовуємо основне рівняння масообміну (1), яке в загальному вигляді визначає швидкість виходу цільових компонентів із чорнобривців:

$$dM/dt = kS(C_{nas} - C). \quad (6)$$

Використовуючи отримані раніше дані про сили та відносну швидкість w , проаналізуємо, як робота РПА з гвинтовим ротором впливає на кожен множник цього рівняння. Згідно з теорією пограничного шару, коефіцієнт k прямо залежить від числа Рейнольдса ($Re_d = wd/v$), де w – та сама відносна швидкість, яку ми розраховували через баланс сил. Завдяки силі інерції приєднаної маси (F_{add}) та пульсаціям, значення w у РПА є на порядок вищим, ніж у звичайних екстракторах. Це призводить до різкого зменшення товщини дифузійного прикордонного шару навколо пелюстки чорнобривця.

Хоча ми розглядаємо екстрагування, у РПА паралельно відбувається процес диспергування. Сила гідродинамічного опору (F) і напруження зсуву в зазорі між ротором і решіткою призводять до подрібнення часток чорнобривців до оптимального розміру. Збільшення площі контакту S без надмірного руйнування структури, що могло б ускладнити подальшу фільтрацію.

Гвинтові пази ротора забезпечують інтенсивне макроперемішування по всій висоті циліндричної камери. Це дає змогу миттєво відводити екстраговані речовини від поверхні частки в об'єм розчинника, підтримуючи концентрацію C біля поверхні на мінімальному рівні. Таким чином, різниця потенціалів ($C_{nas} - C$) залишається максимальною протягом усього циклу обробки.

Фундаментальною особливістю екстрагування чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті є перехід від статичного перемішування до динамічного імпульсного впливу. Математично цей взаємозв'язок реалізується через інтеграцію рівняння руху частки в критеріальне рівняння масопереносу [14; 15]. Шляхом інтеграції гідродинамічних характеристик потоку в кінетичне рівняння (6) ми отримуємо нестационарну модель масопереносу. Вона базується на тому, що ключовий параметр інтенсифікації – коефіцієнт масопереносу k – перестає бути статичною величиною й перетворюється на функцію часу та просторового положення частки в апараті. Математично цей зв'язок реалізується через число Рейнольдса (Re_d), яке визначає режим омивання пелюсток чорнобривців екстрагентом:

$$k(t) = D/d_d Sh = D/d_d f(Re_d(t), Sc), \quad (7)$$

де D – коефіцієнт молекулярної дифузії; Sh – число Шервуда; Sc – число Шмідта; $Re_d(t) = w(t) d_d/v$ – нестационарне число Рейнольдса.

Оскільки відносна швидкість $w(t)$ постійно змінюється внаслідок диференціального рівняння руху (5), ми спостерігаємо такі фізико-математичні ефекти: динамічна зміна коефіцієнта k та подолання дифузійного опору. Підставляючи значення швидкості w з рівняння (5) у рівняння (6), отримуємо модель, де швидкість переходу маси dM/dt пульсує синхронно з проходженням частки крізь гвинтові пази ротора. Нестационарність потоку спричиняє періодичне

стискання та «зривання» прикордонного дифузійного шару. Кожна зміна швидкості в гвинтовому каналі генерує новий імпульс масопереносу, що дає змогу підтримувати високий градієнт концентрації безпосередньо біля поверхні рослинної тканини. Підсумкове рівняння набуває вигляду:

$$dM/dt = f(dv_c/dt, w)S(C_{nas} - C). \quad (8)$$

Побудована нестационарна модель (8) доводить, що основний внесок в інтенсифікацію екстрагування в РПА робить не середнє значення швидкості, а її похідна за часом (прискорення). На рисунку 1 подано графік нестационарної швидкості масопереносу dM/dt в роторно-пульсаційному апараті під час екстрагування чорнобривців.

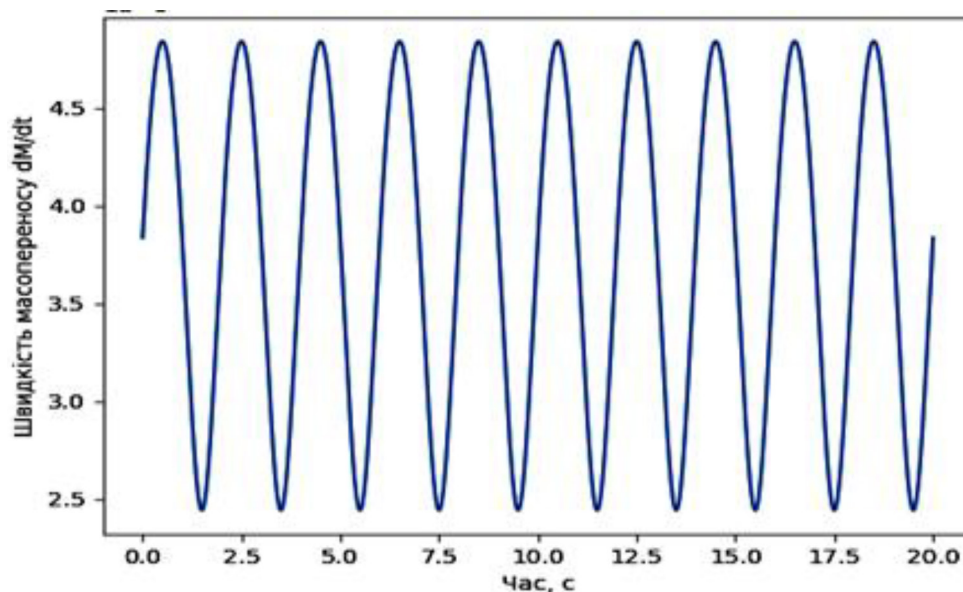


Рис. 1. Графік нестационарної швидкості масопереносу dM/dt

З рис. 1 видно, що швидкість масопереносу dM/dt змінюється періодично внаслідок пульсаційної зміни відносної потоку $w(t)$, що зумовлює коливання числа Рейнольдса й коефіцієнта масопереносу $k(t)$. Пікові значення відповідають моментам інтенсифікації омивання частинок і руйнування прикордонного дифузійного шару, тоді як мінімальні – фазам зниження гідродинамічного впливу. Таким чином, графік підтверджує імпульсний механізм підвищення ефективності масопереносу в динамічному режимі.

Це дає змогу перевести процес із повільної молекулярної дифузії в режим примусової конвекції на рівні мікропор рослинної сировини. Таким чином, використання РПА з гвинтовим ротором дає змогу максимізувати ліву частину рівняння руху dv_d/dt , відповідно, призводить до інтенсивної деформації частинок чорнобривців, що руйнує внутрішні структури клітини та прискорює вихід цільових компонентів (лютеїну) у 5–8 разів порівняно зі стаціонарним перемішуванням.

Висновки. У результаті дослідження процесу екстрагування біоактивних сполук із суцвіть чорнобривців у роторно-пульсаційному апараті (РПА) з гвинтовим ротором установлено, що інтенсифікація масообміну в системі «чорнобривці – екстрагент» досягається завдяки принципу дискретного введення енергії. Створення локальних активних зон із високим рівнем питомої потужності дає змогу мінімізувати час обробки сировини за рахунок миттєвого руйнування прикордонного дифузійного шару.

Розроблено математичну модель руху часток рослинної сировини, яка враховує комплекс гідродинамічних сил. Доведено, що використання ротора з гвинтовими пазами генерує зна-

чні сили інерції приєднаної маси (F_{add}) та високу відносну швидкість фаз (w), що є первинним фактором прискорення виходу цільових компонентів.

Список використаних джерел

1. Stadnyk I., Piddubnuy V., Kravchenko M., Rybchuk L., Kolomiets O., Danylo S. ADHESION OF MARZIPAN PASTES BASED ON DRY DEMINERALIZED WHEY 1160. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 1149–1160. DOI: <https://doi.org/10.5219/1351>
2. Коновалова В. А., Касьянов Г. І., Данильченко С. В. та ін. Екстракційні технології у фармації : підручник. Київ : Наукова думка, 2021. 320 с.
3. Stadnyk I., Piddubnyi V., Mykhailyshyn R., Petrychenko I., Fedoriv V., Kaspruk V. The Influence of Rheology and Design of Modeling Rolls On the Flow and Specific Gravity During Dough Rolling and Injection. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*. 2022. № 22(02). P. 403–421. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0219686723500208>
4. Бурдо О. Г., Терзів С. Г. Кінетика масопереносу в технологіях екстрагування цільових компонентів із фітосировини. *Наукові праці ОНАХТ*. 2020. Вип. 84, Т. 1. С. 12–18.
5. Мальований М. С. Дячок В. В. Екстрагування суміші рослинної сировини. Розрахунок процесу, *Хімічна промисловість України*. 2010. № 4. С. 17–21.
6. Stadnyk I., Piddubnyi V., Krsnozhon S., Antoshkova N. INFLUENCE OF REDUCTION ON ADHESIVE PROPERTIES. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.5219/1195>
7. Кравич А. С. Екстрагування біологічно активних речовин з біомаси *Gladiolus Imbricatus* культивованій в умовах *in vitro* : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2016. С. 159.
8. Буннун П., Туньяситикун П., Кловутімон В., Шотіпрук А. Отримання вільного лютеїну шляхом одночасної екстракції та деестерифікації квіток чорнобривців у зрідженій суміші диметилового ефіру (ДМЕ)–КОН–ЕтОН. *Переробка харчових продуктів та біопродуктів*. 2017. Вип. 106. С. 193–200. DOI: 10.1016/j.fbp.2017.10.002
9. Налаваде П. Б., Гаджар А. К. Мікроінкапсуляція лютеїну, екстрагованого з квіток чорнобривців прямостоячих (*Tagetes erecta* L.), з використанням повного факторіального дизайну. *Журнал науки та технології доставки ліків*. 2016. № 33. P. 75–87. DOI: 10.1016/j.jddst.2016.03.012
10. Zhao L., et al. Comparative analysis of extraction technologies for plant extracts: from traditional to green methods. *Frontiers in Chemistry*. 2025. № 13.
11. Сурендранатх Р., Ганга М., Джавахарлал М., Аніта К. Екстракція та кількісне визначення лютеїну чорнобривців з використанням різних систем розчинників. *Міжнародний журнал фармацевтичних наук. Огляд та дослідження*. 2016. № 37. С. 187–191.
12. Narkprasom N., et al. Optimization for Lutein Extract and Antioxidant Activity from Marigold using safe and green solvents. *BUU Science Journal*. 2025.
13. Chen X., et al. Characterization of Marigold Flower Extracts: Ultrasound-Assisted Extraction and subsequent encapsulation. *MDPI Foods*. 2024. № 13(15).
14. Patel H., Mandle N. Comparative Study of Extraction Methods for Enhancing the Yield of Phytochemicals. *IJPHDT*. 2025. № 2(4).
15. Сидорчук В. М., Іваненко О. П. Математичне моделювання біотехнологічних процесів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2022. 256 с.
16. Dufour C., Loonis M. Kinetics of the oxidation of lutein and zeaxanthin in a model of liquid-solid extraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. Vol. 68, № 15. P. 4456–4463.
17. Ghitescu R. E., Volf I., Carausu C., Popa V. I. Optimization of a polyethylene glycol-assisted extraction of polyphenols from spruce wood bark. *Industrial Crops and Products*. 2021. № 167. P. 113–125.

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





I. Belova¹, V. Hidzhelitskyi², I. Stadnyk³

¹ *Institute of Innovation, Environmental Management and Infrastructure of the Western Ukrainian National University*

² *Kyiv Cooperative Institute of Business and Law*

³ *Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University*

INTENSIFICATION OF MARIGOLD EXTRACTION VIA DISCRETE ENERGY INPUT IN A ROTARY-PULSATION APPARATUS

Summary

The article investigates the intensification of bioactive compound extraction from marigold inflorescences (*Tagetes patula*) using a cylindrical rotary-pulsation apparatus (RPA) with a screw rotor. The application of discrete pulse energy input (DPEI) is scientifically justified to enhance mass transfer rates. Based on the particle motion equation, the role of added mass inertia forces and hydrodynamic resistance in disrupting the boundary diffusion layer is determined. The design features of the RPA ensure high relative phase velocity, significantly reducing extraction time compared to traditional methods while maintaining high yields of target components at optimal energy costs. A fundamental feature of the process in the RPA is the transition from stationary mixing to dynamic impulse action. This relationship is mathematically modeled by integrating the particle motion equation into the mass transfer criteria equation. The study substantiates a shift in the process mechanism: from slow molecular diffusion to forced convection within the micropores of the plant material.

The creation of local active zones with high specific power levels enables the minimization of processing time due to the instantaneous destruction of the boundary diffusion layer. Intense particle deformation disrupts intracellular structures and accelerates the release of target components, specifically lutein. Consequently, the process duration is reduced by 5–8 times compared to conventional stationary mixing. The findings demonstrate the high efficiency of the proposed technology for obtaining natural antioxidants for food and pharmaceutical applications.

Keywords: marigolds, extraction, rotary-pulsation apparatus, discrete pulse energy input, added mass, relative velocity, mass transfer intensification, diffusion phase impact.