

УДК 664.3.032.1:665.3.002

DOI <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-274>

Ігор СТАДНИК

доктор технічних наук, професор, професор кафедри обладнання харчових технологій, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Бендери, 56, м. Тернопіль, Україна, 46001 (igorstadnykk@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-4126-3256

SCOPUS: 57202160255

Ірина БЕЛОВА

кандидат економічних наук, доцент, заступник директора навчально-наукового інституту інноватики, природокористування та інфраструктури, Західноукраїнський національний університет, вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна, 46001 (i.belova@wuni.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-1497-7133

SCOPUS: 57224251838

Андрій ЧАГАЙДА

кандидат технічних наук, доцент, доцент відділення аграрної економіки і продовольства, Національна академія аграрних наук України, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 9, м. Київ, Україна, 010105 (ktgrs_chao@ztnu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-5399-3654

SCOPUS: 57952042200

Тетяна ГРОХОЛЬСЬКА

доктор філософії, викладач кафедри агробіотехнологій, Західноукраїнський національний університет, вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна, 46001 (hrokholskat@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1642-2203

Сергій ГОЛЯЧУК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій та хімії, Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна, 43018 (foodchem@lntu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-4835-8154

Маргарита ПАРУБОК

кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології, Уманський національний університет, вул. Інститутська, 1, м. Умань, Україна, 20301 (m.parubok69@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7228-4669

Віталій МИХАЙЛИК

кандидат технічних наук, асистент кафедри ресторанних і крафтових технологій, Державний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, м. Київ, Україна, 02156 (v.tykhaylyk@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-7604-4403

Бібліографічний опис статті: Стадник І., Белова І., Чагайда А., Грохольська Т., Голячук С., Парубок М., Михайлик В. (2026). Кінетика екстрагування біологічно активних речовин із лікарської рослинної сировини *Tagetes erecta* L. *Фітотерапія*. Часопис, 2, 274–286, doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-274>

КІНЕТИКА ЕКСТРАГУВАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН ІЗ ЛІКАРСЬКОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ *TAGETES ERECTA* L.

Актуальність. З метою розробки нових математичних підходів до опису кінетики періодичних процесів вилучення субстанцій природного походження актуальним є аналіз ефективності основних методів екстрагування біологічно активних речовин із лікарської рослинної сировини. Швидкість процесу визначається поєднанням внутрішнього дифузійного опору та зовнішнього масообмінного опору, що зумовлює необхідність переходу від емпіричного підбору режимів до науково обґрунтованого їх розрахунку.

Мета роботи – порівняльний аналіз методів мацерації, перколяції, дигерування та ремацерації з розробкою уніфікованого математичного підходу до опису їх кінетики.

Матеріали та методи. Об'єктом дослідження вибрано сировину *Tagetes erecta* L.; цільові компоненти – каротиноїди та флавоноїди. Екстрагування проводили у водно-етанольних середовищах (40–70 % об.) за контрольованих температурно-гідродинамічних умов. Кінетичні дані використано для визначення інтегральних масообмінних характеристик і оцінки ефективності досліджуваних методів.

Результати дослідження та їх обговорення. У роботі досліджено кінетику періодичних процесів екстрагування біоактивних речовин із рослинної сировини чорнобривців. Для уніфікованого опису мацерації, перколяції, дигерування та ремацерації, застосовано двостадійну кінетичну модель, яка враховує послідовну дію внутрішнього дифузійного та зовнішнього масообмінного опорів. Показано, що кінетика процесу адекватно описується узагальненим рівнянням першого порядку з використанням ефективного коефіцієнта масопередачі K . На основі аналізу експериментальних кінетичних кривих та їх лінеаризації встановлено відмінності режимів масопередачі для різних методів екстрагування.

Мацерація характеризується дифузійно-контрольованим режимом і мінімальними значеннями K , тоді як перколяція забезпечує найвищу інтенсивність процесу шляхом зменшення зовнішнього масообмінного опору. Дигерування та ремацерація займають проміжне положення, поєднуючи температурну та гідродинамічну інтенсифікацію.

Встановлено закономірність зростання коефіцієнта масопередачі в ряду: $K_{\text{мац}} < K_{\text{диг}} < K_{\text{кремац}} < K_{\text{кперк}}$. Показано, що коефіцієнт внутрішньої дифузії істотно залежить від морфолого-анатомічних особливостей сировини, а підвищення температури сприяє інтенсифікації процесу екстрагування. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів періодичного екстрагування біоактивних речовин із рослинної сировини.

Висновки. Розроблено уніфікований підхід до опису кінетики періодичного екстрагування біоактивних речовин із рослинної сировини, заснований на використанні ефективного коефіцієнта масопередачі K . Показано адекватність двостадійної кінетичної моделі, яка враховує послідовну дію внутрішнього дифузійного та зовнішнього масообмінного опорів та забезпечує високу відповідність експериментальним даним.

Встановлено пріоритетність перколяції як найефективнішого методу завдяки мінімізації зовнішнього масообмінного опору. Мацерація лімітується дифузійною, тоді як дигерування та ремацерація забезпечують проміжну інтенсифікацію. Визначено залежність дифузії від морфології *Tagetes erecta* L.: масоперенос максимальний у квітках і мінімальний у стеблах. Доведено, що нагрівання до 60–75 °C прискорює екстракцію через зростання коефіцієнта дифузії. Результати дають змогу перейти від емпіричного вибору до інженерного розрахунку технологій отримання рослинних інгредієнтів.

Ключові слова: чорнобривці (*Tagetes erecta* L.), екстрагування, кінетичне моделювання, коефіцієнт масопередачі, дифузія, лутеїн, каротиноїди, перколяція.

Igor STADNYK

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Food Production Equipment, Ternopil Ivan Puliuj National Technical University, Bendery str., 56, Ternopil, Ukraine, 46001 (igorstadnykk@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-4126-3256

SCOPUS: 57202160255

Iryna BELOVA

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Deputy Director of the Educational and Scientific Institute of Innovation, Environmental Management and Infrastructure, West Ukrainian National University, Lvivska str., 11, Ternopil, Ukraine, 46001 (i.belova@wunu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-1497-7133

SCOPUS: 57224251838

Andrew CHAHADA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Agricultural Economics and Food, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Mykhailo Omelianovych-Pavlenko str., 9, Kyiv, Ukraine, 01010 (ktgrs_chao@ztu.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-1826-9545

SCOPUS: 57219915019

Tetiana HROKHOLSKA

PhD, Lecturer at the Department of Agrobiotechnologies, West Ukrainian National University, Lvivska str., 11, Ternopil, Ukraine, 46001 (hrokholskat@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-1642-2203

Serhiy HOLYACHUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Food Technologies and Chemistry, Lutsk National Technical University, Lvivska str., 75, Lutsk, Ukraine, 43018 (foodchem@lntu.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-4835-8154

Marharyta PARUBOK

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Biology, Uman National University, Instytutska str., 1, Uman, Ukraine, 20301 (m.parubok69@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-7228-4669

Vitaliy MYKHAYLIK

Candidate of Technical Sciences, Assistant at the Department of Restaurant and Craft Technologies State University of Trade and Economics 19, Kyoto str., Kyiv, Ukraine, 02156 (v.mykhaylyk@knute.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-7604-4403

To cite this article: Stadnik I., Belova I., Chagaida A., Grokholska T., Holyachuk S., Parubok M., Mykhaylik V. (2026). Kinytyka ekstrakuvannya biolohichno aktyvnykh rechovyn iz likarskoi roslynnoi syrovyny *Tagetes erecta* L. [Kinetics of extraction of biologically active substances from medicinal plant raw material *Tagetes erecta* L.]. *Phytotherapy. Journal*, 2, 274–286, doi: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2026-2-274>

KINETICS OF EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM MEDICINAL PLANT RAW MATERIAL *TAGETES ERECTA* L.

Topicality. In order to develop new mathematical approaches to describing the kinetics of periodic processes of extracting substances of natural origin, it is relevant to analyze the effectiveness of the main methods of extracting biologically active substances from medicinal plant raw materials. The process speed is determined by the combination of internal diffusion resistance and external mass transfer resistance, which necessitates the transition from empirical selection of modes to their scientifically based calculation.

The method of work is a comparative analysis of the methods of maceration, percolation, digestion and re-maceration with the development of a unified mathematical approach to describing their kinetics.

Materials and methods. The object of research was the selected raw material *Tagetes erecta* L.; target components were carotenoids and flavonoids. Extraction was carried out in water-ethanol media (40–70% vol.) under controlled temperature-hydrodynamic conditions. Kinetic data were used to determine the integral mass transfer characteristics and assess the effectiveness of the studied methods.

Results and discussion. The work investigates the kinetics of periodic processes of extraction of bioactive substances from marigold plant raw materials. For a unified description of maceration, percolation, digestion and re-maceration, a two-stage kinetic model is used, which takes into account the sequential action of internal diffusion and external mass transfer resistances. It is shown that the kinetics of the process is adequately described by a generalized first-order equation using the effective mass transfer coefficient K . Based on the analysis of experimental kinetic curves and their linearization, differences in mass transfer modes for different extraction methods were established. Maceration is characterized by a diffusion-controlled regime and minimal K values, while percolation provides the highest process intensity by reducing external mass transfer resistance. Digestion and re-maceration occupy an intermediate position, combining temperature and hydrodynamic intensification.

The regularity of the increase in the mass transfer coefficient in the series: $K_{mac} < K_{dig} < K_{re-mac} < K_{perk}$ has been established. It has been shown that the internal diffusion coefficient significantly depends on the morphological and anatomical features of the raw material, and an increase in temperature contributes to the intensification of the extraction process. The results obtained can be used to optimize the regimes of periodic extraction of bioactive substances from plant raw materials.

Conclusions. A unified approach to describing the kinetics of batch extraction of bioactive substances from plant raw materials has been developed, based on the use of the effective mass transfer coefficient K . The adequacy of the two-stage kinetic model, which takes into account the sequential action of internal diffusion and external mass transfer resistances and provides a high correspondence to experimental data, is shown.

Percolation is prioritized as the most efficient method due to the minimization of external mass transfer resistance. Maceration is diffusion limited, while digestion and re-maceration provide intermediate intensification. The dependence of diffusion on the morphology of *Tagetes erecta* L. was determined: mass transfer is maximum in flowers and minimum in stems. It is proven that heating to 60–75 °C accelerates extraction due to an increase in the diffusion coefficient. The results allow us to move from empirical selection to engineering calculation of technologies for obtaining plant ingredients.

Key words: marigolds (*Tagetes erecta* L.), extraction, kinetic modeling, mass transfer coefficient, diffusion, lutein, carotenoids, percolation.

Вступ. Актуальність. Використання лікарських та ефіроолійних рослин у фармацевтичній, харчовій і косметичній промисловості є сталою світовою тенденцією, яку зумовлено високою біологічною активністю природних сполук – флавоноїдів, полісахаридів, вітамінів, каротиноїдів та ефірних олій. Комплексний склад рослинної сировини забезпечує синергічну дію

біологічно активних речовин, які, на відміну від синтетичних аналогів, зумовлюють м'якший та фізіологічно збалансований вплив на організм людини. Це є особливо важливим для створення функціональних продуктів харчування та дієтичних добавок.

Перевагою фітопрепаратів є їх біологічна сподібність з організмом людини, зумовлена спільні-

стю фундаментальних принципів будови клітинних мембран та обмінних процесів. Біологічно активні речовини рослинного походження характеризуються ширшим терапевтичним інтервалом між ефективною та токсичною дозами, зниженим ризиком побічних ефектів і можливістю тривалого застосування. Наявність фітогормонів та інших регуляторних сполук, активних у малих концентраціях, забезпечує м'яку модуляцію фізіологічних процесів, що підвищує цінність рослинних екстрактів у складі функціонального харчування.

Серед перспективних видів лікарської рослинної сировини особливе місце посідають чорнобривці (*Tagetes spp.*), які характеризуються багатим і різноманітним фітохімічним складом (Karpyk et al., 2025; Slobodianiuk et al., 2021, Berdei et al., 2011). Суцвіття та листя цієї рослини містять каротиноїди, флавоноїди, поліфенольні сполуки, терпеноїди, ефірні олії та полісахариди, що зумовлює їх антиоксидантну, протизапальну й антимікробну активність (Vishnevskaya, 2008). Цінність лікарської рослинної сировини для харчової та суміжних галузей промисловості визначається високим вмістом вторинних метаболітів із вираженою біологічною та технологічною функціональністю (Karpyk et al., 2025; Shostak et al., 2014).

Ключовими біологічно активними компонентами чорнобривців є каротиноїди, зокрема лютеїн і зеаксантин, які визначають їх високу біологічну та технологічну цінність. Ці сполуки відіграють важливу роль у підтриманні зорових функцій, проявляючи антиоксидантну дію та знижуючи ризик розвитку дегенеративних змін органів зору (Berg & Lin, 2014; Ionova-Doing et al., 2013).

Оскільки лютеїн не синтезується в організмі людини, його надходження можливе з харчових джерел або у складі функціональних продуктів і дієтичних добавок. У рослинній сировині каротиноїди присутні як у вільній формі, так і у вигляді ефірів жирних

кислот, що істотно впливає на вибір методів та умов екстрагування (Kyslychenko & Kuznetsova, 2018).

Високий вміст лютеїну та зеаксантину зумовлює можливість використання екстрактів чорнобривців як натуральних барвників, що забезпечують інтенсивне жовто-помаранчеве забарвлення харчових продуктів та відповідають концепції *clean label*. Водночас виражена ліпофільність каротиноїдів потребує обґрунтованого вибору екстрагентів і технологічних режимів їх вилучення (Dekhtereva & Gorlachova, 2016; Peter et al., 2012). Окрім каротиноїдів, суцвіття та листя чорнобривців містять флавоноїди та поліфенольні сполуки (кверцетин, рутин), які проявляють антиоксидантні, протизапальні й капіляророзміцнювальні властивості та позитивно впливають на обмінні процеси в організмі (Silva & Rodrigues, 2020).

Перспективним напрямом застосування екстрактів чорнобривців є їх використання у виробництві борошняних виробів, де вони виконують одночасно технологічні та функціональні ролі. Основні напрями такого використання узагальнено в табл. 1.

Таким чином, екстрагування чорнобривців спрямоване на отримання стандартизованих екстрактів, які дають змогу трансформувати традиційні борошняні вироби у функціональні продукти харчування. Процес екстрагування є ключовою стадією виробництва фітопрепаратів і функціональних інгредієнтів та підпорядковується загальним законам масопередачі (Kononova et al., 2021). Його інтенсивність визначається як структурно-морфологічними особливостями рослинної клітини, так і фізико-хімічною спорідненістю між екстрагентом і цільовими компонентами.

Проектування й аналіз роботи екстракційної апаратури періодичної дії безпосередньо пов'язані з кількісною оцінкою масообмінних характеристик процесу (Burdo & Terziyev, 2020). Інтенсивність екстрагування визначається поєднанням внутрішнього

Таблиця 1
Технологічні та функціональні властивості чорнобривців як інгредієнта борошняних виробів (Marchyshyn et al., 2025)

Завдання	Опис впливу активних компонентів	Цільовий компонент
Функціональне збагачення	Збагачення продукту незамінними каротиноїдами для профілактики зорових порушень та підвищення антиоксидантного статусу організму	Лютеїн, зеаксантин
Натуральне забарвлення	Надання борошняним виробам привабливого жовтого або золотистого відтінку, що є альтернативою синтетичним барвникам	Каротиноїди
Пролонгування свіжості	Антиоксидантна дія флавоноїдів та поліфенолів може уповільнювати процеси окислення жирів у виробках, потенційно збільшуючи термін їх зберігання	Флавоноїди, поліфеноли
Ароматичні властивості	Ефірні олії можуть надавати виробам приємного, ледь вловимого аромату, що є елементом ароматерапії та підвищує органолептичні характеристики	Терпеноїди, ефірні олії

дифузійного та зовнішнього масообмінного опорів. Внутрішнє масоперенесення характеризується коефіцієнтом дифузії, який, за даними ряду досліджень (Malovany & Dyachok, 2010), залежить від температури, ступеня подрібнення та структурного стану клітинних стінок і часто є лімітованим для повільних методів, зокрема мацерації. Зовнішній масообмін описується коефіцієнтом масовіддачі, що визначається гідродинамічними умовами процесу, як-от інтенсивність перемішування або швидкість протікання екстрагента (Dyachok & Malovany, 2008).

Кількісне визначення кінетичних коефіцієнтів та встановлення їх залежності від температури, тривалості процесу та гідродинамічних умов дає змогу обґрунтовано вибирати оптимальні режими екстрагування, прогнозувати досяжні граничні концентрації цільових компонентів та мінімізувати втрати біологічно активних речовин у шроті (Sydorchuk & Ivanenko, 2022). Ефективність вилучення також істотно залежить від фізичного стану й локалізації цільових компонентів у структурі рослинної сировини (Dufour & Loonis, 2020; Ghitescu et. al., 2021), що узагальнено в табл. 2.

Різноманітність морфологічних характеристик рослинної сировини зумовлює доцільність застосування узагальнених кінетичних моделей для порівняльного аналізу різних методів екстрагування. У цьому контексті методи математичного моделювання (Patil & Ghalas, 2019; Zhang & Wen, 2021; Crank, 1975) є ефективним інструментом для оцінки впливу технологічних параметрів та їх взаємодії на інтенсивність масоперенесення й вихід біологічно активних речовин.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні узагальненої кінетичної моделі екстрагування біологічно активних речовин із чорнобривців (*Tagetes erecta* L.), що дає змогу здійснювати порівняльну оцінку ефективності різних періодичних методів екстрагування (мацерації, дигерування, перколяції та ремацерації) на основі інтегрального коефіцієнта масопередачі. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель враховує сумарний вплив внутрішньодифузійних та зовнішніх масообмінних опорів і може бути використана

для прогнозування кінетики вилучення каротиноїдів та флавоноїдів із рослинної сировини різної морфологічної структури.

Мета дослідження – встановити кінетичні закономірності екстрагування біологічно активних речовин із чорнобривців прямостоячих (*Tagetes erecta* L.), визначити вплив способу екстрагування та морфологічної структури рослинної сировини на коефіцієнти масопередачі й дифузії, а також розробити узагальнену математичну модель процесу для обґрунтування раціональних технологічних режимів вилучення каротиноїдів і флавоноїдів.

Матеріали та методи. *Об'єкти дослідження.* Для експериментального дослідження кінетичного процесу екстрагування та розробки уніфікованої математичної моделі використано лікарську рослину сировину з різною морфологічною структурою та хімічним складом, а саме квітки, листя та стебла чорнобривців прямостоячих (*Tagetes erecta* L.). Використання різних морфологічних частин рослини дало можливість узагальнити результати досліджень та оцінити вплив структурно-морфологічних особливостей сировини на інтенсивність масоперенесення під час екстрагування. Основними цільовими компонентами дослідження були лютеїн і зеаксантин як представники ліпофільних каротиноїдів, а також флавоноїди, які належать до гідрофільних та амфіфільних біологічно активних сполук.

Підготовка сировини та вибір екстрагента. Рослинну сировину попередньо висушували до стандартної вологості, відповідно до вимог фармакопейних нормативів, після чого подрібнювали до фракційного складу 1–3 мм. Як екстрагент використовували водно-етанолові розчини з концентрацією етанолу 40–70 % (об.). Вибір водно-спиртової системи зумовлений її універсальністю щодо вилучення як гідрофільних компонентів (полісахаридів, частини флавоноїдів), так і помірно ліпофільних сполук (каротиноїдів), а також безпечністю та придатністю для застосування у харчових і фармацевтичних технологіях.

Для вилучення каротиноїдів (лютеїну та зеаксантину) використовували водно-етанолові розчини

Таблиця 2

Фізичний стан цільових компонентів у рослинній сировині та його вплив на екстрагування

Стан цільового компонента	Характеристики	Технологічні наслідки
У розчинному стані у порах (клітинному соку)	Характерно для незруйнованої, свіжої рослинної клітини. Дифузія відносно легка	Потребує менш агресивних методів екстракції
У вигляді твердої розчинної речовини	Характерно для висушеної сировини або сировини, обробленої хімічно, електричним струмом, бароефектами чи механічним віджиманням	Вимагає попереднього розчинення компонента перед дифузією; коефіцієнт D може бути низьким

з концентрацією етанолу 60–70 % (об.), які забезпечують підвищену розчинність ліпофільних компонентів. Для вилучення флавоноїдів застосовували водно-етанолові розчини концентрацією 40–50 % (об.), які забезпечують ефективне екстрагування поліфенольних сполук та мінімізують супутнє вилучення баластних речовин.

Співвідношення твердої та рідкої фаз у всіх експериментах підтримували сталим і становило 1 : 10 (м/м), що є типовим для періодичних процесів екстрагування та забезпечує достатній градієнт концентрацій для ефективного перебігу масоперенесення.

Умови та методи екстрагування. Дослідження проводили з використанням класичних періодичних методів екстрагування, які широко застосовуються в лабораторній та малотоннажній практиці, а саме мацерації, перколяції, дигерування та ремацерації (Svitlenka et al., 2021). Такий підхід дав змогу здійснити порівняльний аналіз їх кінетичної ефективності та реалізувати єдиний математичний опис процесів незалежно від морфологічних особливостей сировини.

Експерименти здійснювали в лабораторному реакторі періодичної дії з механічним перемішуванням (для процесів мацерації та дигерування). Основні умови проведення експериментів наведено в табл. 3.

Методи аналітичного контролю. Кількісне визначення лютеїну та зеаксантину в отриманих екстрактах здійснювали методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ), що забезпечує високу селективність та точність аналізу каротиноїдів. Антиоксидантну активність екстрактів оцінювали спектрофотометричним методом із використанням стабільного радикала DPPH (2,2-дифеніл-1-пікрілгідразил).

Результати досліджень та їх обговорення. Кінетичне моделювання процесу екстрагування. Для забезпечення єдиного математичного опису періодичних процесів екстрагування й об'єктивного порівняння ефективності різних методів (мацерації, перколяції, дигерування та ремацерації) було використано кінетичний підхід, що враховує обидва основні опори масопередачі: внутрішній (дифузійний) та зовнішній (масовіддачі).

Процес екстрагування з рослинної сировини є гетерогенним і контролюється послідовною дією двох стадій: перенесенням цільового компонента всередині твердої частки та його переходом через міжфазну поверхню в рідку фазу (Patil & Ghalas, 2019). Відповідно для опису кінетики було застосовано двостадійну модель, яка поєднує спрощені рівняння дифузії у твердій фазі з рівняннями зовнішньої масопередачі. Процес контролюється перенесенням цільових компонентів – ліпофільних каротиноїдів (лютеїну, зеаксантину) та гідрофільних флавоноїдів – через міжфазну поверхню. Швидкість зміни концентрації цільового компонента в екстрагенті C_t у часі описується моделлю з інтегральним коефіцієнтом масопередачі, який узагальнює сумарний вплив внутрішньої дифузії та зовнішньої масовіддачі на перебіг процесу екстрагування (Zaitsev, 2019):

$$dC_t/dt=f(D,k,C_{eq}-C_t), \quad (1)$$

де: D – коефіцієнт внутрішньої дифузії у твердій фазі; k – коефіцієнт масовіддачі на межі фаз; C_{eq} – рівноважна концентрація цільового компонента в екстрагенті.

З урахуванням послідовного характеру опорів масопередачі процес екстрагування було описано узагальненим рівнянням першого порядку:

$$dC_t/dt=K(C_{eq}-C_t), \quad (2)$$

де: K – загальний (ефективний) коефіцієнт масопередачі, який інтегрує внесок внутрішнього дифузійного та зовнішнього масообмінного опорів.

Фізичний зміст коефіцієнта K полягає у кількісній характеристиці сумарної швидкості перенесення цільового компонента від внутрішнього об'єму рослинної частки до об'єму екстрагента. На відміну від коефіцієнта дифузії D та коефіцієнта масовіддачі k , які характеризують окремі стадії масопереносу, коефіцієнт K інтегрально відображає загальний кінетичний опір процесу та може використовуватися як універсальний критерій порівняння ефективності різних способів екстрагування.

На рис. 1 представлено залежність відносної концентрації цільових компонентів у рідкій фазі, розра-

Таблиця 3

Основні умови експерименту та їх обґрунтування

Параметр	Умови експерименту	Примітка
Температурний режим	Ізотермічний, 20–60 °C	Дослідження температурної залежності кінетичних коефіцієнтів
Оптимальна температура	До 60 °C	Подальше підвищення температури може спричинити термодеградацію лютеїну та ефірних олій
Час екстракції	5–180 хв	Для побудови кінетичних кривих та визначення рівноважного стану
Швидкість перемішування	Стала, відтворювана	Впливає на коефіцієнт масовіддачі (k)

хованої за рівнянням (2) від часу екстрагування t для різних періодичних методів: мацерації, дигерування, перколяції та ремацерації за фіксованої температури ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) та сталого співвідношення фаз (1 : 10). Кінетичні криві мають типовий експоненційний характер і відображають поступове наближення системи до рівноважного стану.

Експоненційний характер кривих свідчить про те, що вилучення лютеїну та зеаксантину на початкових етапах відбувається найінтенсивніше завдяки розчиненню речовин з поверхні зруйнованих клітин. Найменший кут нахилу характерний для мацерації, що свідчить про дифузійно-контрольований характер процесу. Перколяція демонструє найшвидше зростання концентрації на початковій стадії, що зумовлено мінімізацією зовнішнього масообмінного опору та підтриманням максимального градієнта концентрації. Дигерування займає проміжне положення, поєднуючи вплив температурної інтенсифікації з помірною гідродинамікою.

Інтегрування рівняння (2) за умови $C_t = 0$ та $t = 0$ дає робочу формулу для обробки експериментальних даних:

$$\ln(C_{eq} / (C_{eq} - C_t)) = Kt. \quad (3)$$

Лінеаризована форма рівняння дає змогу визначати значення коефіцієнта K шляхом побудови залежності від часу t :

$$Y = \ln(C_{eq} / (C_{eq} - C_t)). \quad (4)$$

При цьому коефіцієнт K визначається як тангенс кута нахилу прямої, отриманої методом найменших квадратів. На рис. 2 наведено лінеаризацію кінетич-

них даних чорнобривців відповідно до рівняння першого порядку (3).

Отримані експериментальні точки формують прямолінійні залежності з високим коефіцієнтом кореляції ($R^2 > 0.95$), що підтверджує адекватність застосованої двостадійної моделі масопередачі. Тангенс кута нахилу кожної прямої відповідає загальному коефіцієнту масопередачі K , який інтегрує внутрішній (дифузійний) та зовнішній (масовіддачі) опори. Найбільше значення нахилу зафіксовано для перколяції, що підтверджує її найвищу кінетичну ефективність.

На рис. 3 представлено порівняльний аналіз значень загального коефіцієнта масопередачі K , визначених за результатами лінеаризації кінетичних кривих для різних періодичних методів екстрагування.

Із рис. 3 видно, що значення коефіцієнта K зростає у такій послідовності: $K_{\text{мац}} < K_{\text{диг}} < K_{\text{ремац}} < K_{\text{перк}}$. Оскільки лютеїн і зеаксантин є ліпофільними сполуками, їх перехід у водно-етанолове середовище лімітується не тільки дифузією, а й гідродинамічними умовами. Перколяція виявилася найбільш ефективною, оскільки мінімізує зовнішній опір масопередачі. Це свідчить про перехід від дифузійно-контрольованого режиму (мацерація) до режиму, обмеженого переважно зовнішньою масовіддачею (перколяція). Таким чином, коефіцієнт K може бути використаний як універсальний критерій кінетичної ефективності періодичних процесів екстрагування незалежно від морфології сировини.

Коефіцієнт масовіддачі k визначає швидкість перенесення цільового компонента від поверхні твердої частки в об'єм екстрагента і залежить суто

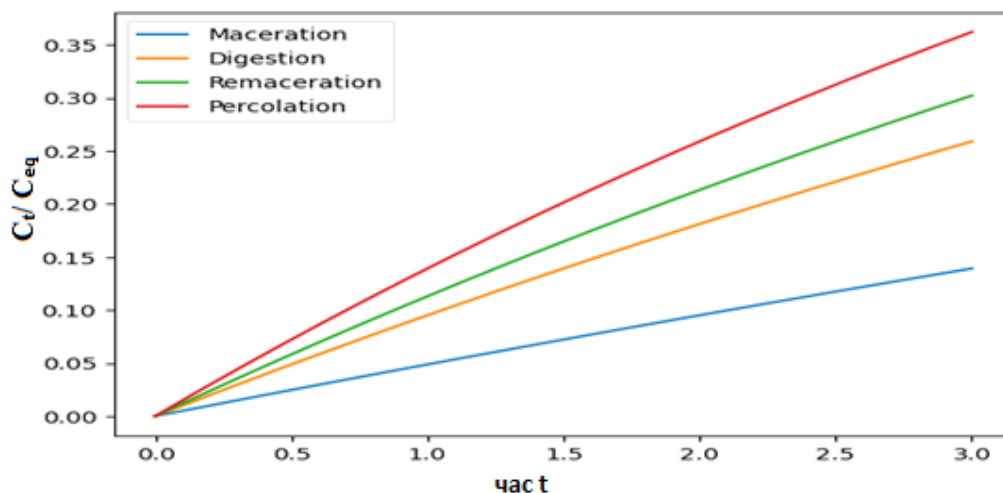


Рис. 1. Кінетичні криві екстрагування цільових компонентів із чорнобривців

від гідродинамічних умов процесу: інтенсивності перемішування, швидкості протікання екстрагента, в'язкості та густини рідкої фази, а також геометрії апарату (Stadnyk et al., 2025; Stadnyk et al., 2020). Для перколяції та інтенсивного дигерування значення k є значно вищим порівняно з мацерацією, що зумовлює загальну інтенсифікацію.

Використання загального коефіцієнта масопередачі K є доцільним для порівняльного аналізу різних періодичних методів, оскільки він не залежить від конкретного механізму лімітування й відображає сумарну кінетичну ефективність процесу. Коефіцієнт масовіддачі k визначався переважно для процесів, у яких гідродинамічні умови відіграють вирішальну роль, зокрема для перколяції та екстрагування з інтенсивним перемішуванням. Встановлено, що значення k безпосередньо залежить

від швидкості руху екстрагента або інтенсивності механічного впливу на систему. За умов перколяції постійне оновлення рідкої фази забезпечує підтримання максимального градієнта концентрації на межі розділу фаз, що призводить до істотного зростання коефіцієнта масовіддачі порівняно зі статичною мацерацією.

Порівняльну оцінку чотирьох періодичних методів екстрагування було проведено на основі їх кінетичної ефективності (вихід РСР за одиницю часу) та кінцевого ступеня вилучення цільових компонентів (табл. 4).

З урахуванням необхідності ефективного вилучення ліпофільних каротиноїдів і водночас мінімізації їх термічної деградації встановлено, що найбільш перспективними методами є перколяція з контрольованою швидкістю потоку та дигерування за обмеже-

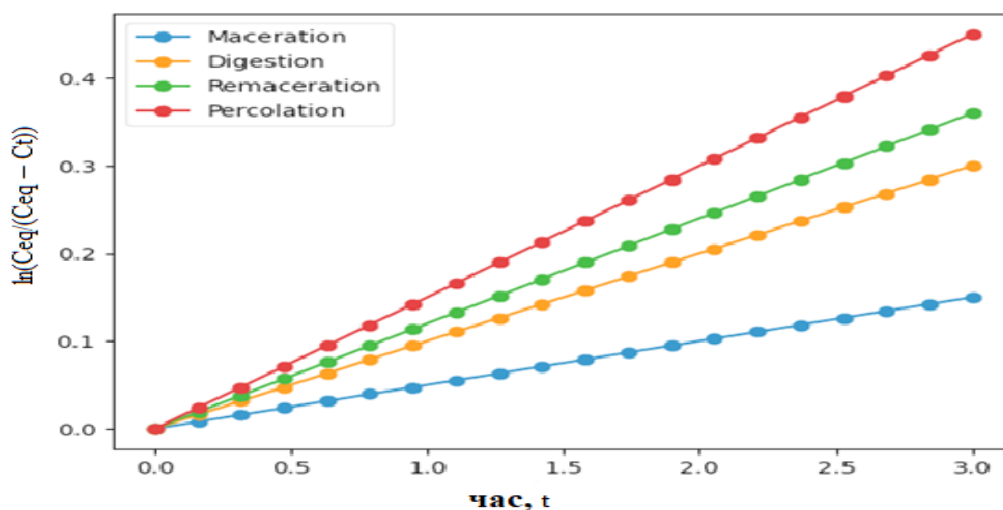


Рис. 2. Лінеаризація кінетичних даних у координатах $\ln(C_{eq}/(C_{eq} - C_t))$



Рис. 3. Порівняння загального коефіцієнта масопередачі K для різних методів екстрагування

ного температурного режиму. Перколяція завдяки постійному підтриманню високого градієнта концентрації забезпечує найшвидше досягнення високого ступеня вилучення.

Таблиця 4

Ступінь вилучення цільових компонентів

Метод	Характеристика процесу	Кінетична ефективність
Мацерація	Статичне настоювання	Найнижча швидкість екстрагування, тривалий час досягнення рівноваги
Дигерування	Мацерація за підвищеної температури	Значне прискорення процесу за рахунок зростання D; високий кінцевий вихід
Перколяція	Протікання екстрагента через шар сировини	Найвища кінетична ефективність, максимальний градієнт концентрації
Ремацерація	Послідовна екстракція свіжими порціями екстрагента	Високий кінцевий вихід завдяки тривалості процесу

Коефіцієнт дифузії D характеризує швидкість перенесення розчинної речовини всередині твердої рослинної частки крізь пори та клітинні стінки під дією градієнта концентрації. Значення D істотно залежить від температури, в'язкості екстрагента та структурних особливостей сировини. Температурна залежність коефіцієнта дифузії описується рівнянням Арреніуса (Crank, 2008):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (5)$$

де: D_0 – передекспоненційний множник; E_a – енергія активації дифузії; R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура.

Підвищення температури та ступеня руйнування клітинної структури призводить до зростання D, що є характерним для мацерації та повільних режимів екстрагування.

Для об'єктивного порівняння періодичних методів екстрагування (мацерації, перколяції, дигерування та ремацерації) було застосовано єдиний математичний підхід до аналізу кінетичних даних. Розрахунок коефіцієнта D здійснювався на основі експериментальних кінетичних кривих, отриманих у режимі мацерації, з використанням розв'язків другого закону Фіка, з урахуванням характерної геометрії частинок рослинної сировини. Значення коефіцієнтів дифузії для різних морфологічних фракцій чорнобривців наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для різних фракцій чорнобривців (70 °C)

Сировина	$D \cdot 10^{-10}$, м ² /с	Морфологічна характеристика
Стебло	Найнижче	Щільна, малопориаста структура, відносно великі частинки
Листя	Середнє	Пухка структура, підвищена пористість
Квітки чорнобривців	Високе	Високий вміст ліпофільних компонентів, дифузія ускладнена клітинними оболонками
Стебло з листям	Найвище	Значна частка зруйнованих клітин, висока доступність внутрішніх компонентів

Отримані результати свідчать, що морфологічна структура сировини істотно впливає на величину коефіцієнта дифузії і, відповідно, на лімітувальну стадію процесу екстрагування. Найменші значення D характерні для стеблової частини, тоді як подрібнені комбіновані фракції (стебло з листям) демонструють максимальні значення, що пояснюється інтенсивнішим руйнуванням клітинних стінок. Для глибшого розуміння було розраховано коефіцієнт внутрішньої дифузії D для різних частин чорнобривців. На рис. 4 наведено кінетику дифузійного екстрагування різних частин чорнобривців (квітки, листя, стебло, стебло з листям).

Побудований графік кінетики дифузії (рис. 4) для різних морфологічних частин чорнобривців показав, що квітки мають найбільшу швидкість дифузії та найкоротший час досягнення рівноваги. Цьому сприяють пористість тканин, менша товщина клітинних стінок, підвищений вміст пігментів та ефірних компонентів і локалізація каротиноїдів у хромопластах, що легко руйнуються. Листя демонструє дещо повільнішу кінетику, що пов'язано з більш упорядкованою клітинною структурою та наявністю кутикули, яка частково обмежує масоперенесення та створює бар'єр для виходу лютеїну. Стебло характеризується найменшою швидкістю дифузії через високу щільність механічних тканин, значну частку лігніфікованих клітин та більший дифузійний опір. Стебло з листям має проміжний характер, що підтверджує ефект структурної гетерогенності суміші частинок.

Для верифікації експериментальних даних використано спрощений розв'язок другого закону Фіка для сферичної частинки:

$$\frac{C_t}{C_{eq}} = 1 - \exp\left(-\frac{D \pi^2 t}{R^2}\right),$$

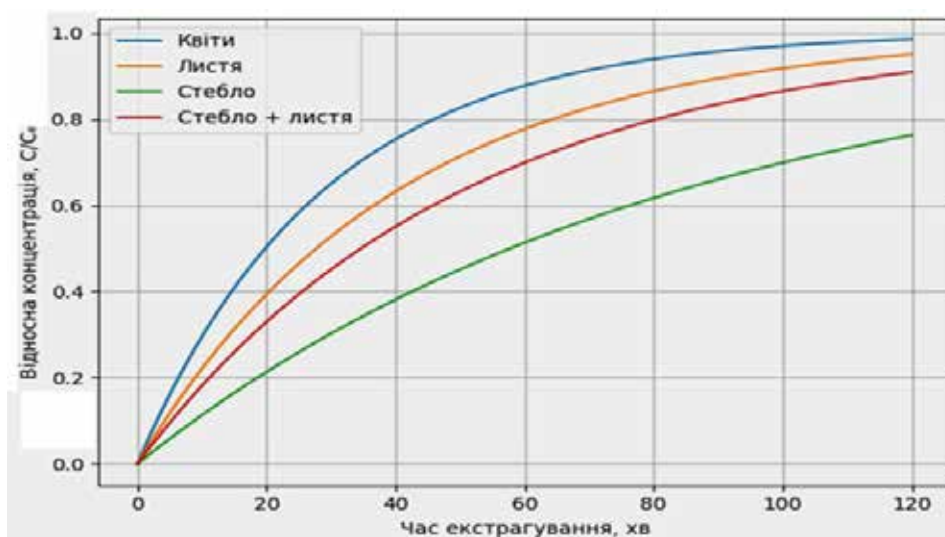


Рис. 4. Кінетика дифузійного екстрагування різних частин чорнобривців

де: D – коефіцієнт внутрішньої дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; R – характерний радіус частинки, м ; t – час екстрагування, с .

Отримані експериментальні криві добре узгоджуються з розрахунковими залежностями, що підтверджує адекватність використаної дифузійної моделі.

Дифузійні криві свідчать (рис. 4), що анатомічна структура рослинної сировини істотно впливає на кінетику масоперенесення. Саме тому застосування НВЧ-нагріву є найбільш ефективним для фракцій із підвищеним внутрішнім дифузійним опором (листя, стебло), оскільки мікрохвильове випромінювання забезпечує селективне об'ємне нагрівання. Застосування НВЧ-нагріву дає змогу зменшити також руйнування клітинних стінок та інтенсифікацію внутрішньої дифузії.

Експериментальні дослідження підтвердили загальні закономірності масопередачі в системі «рослинна сировина – водно-етаноловий екстрагент». Встановлено, що для всіх морфологічних фракцій чорнобривців підвищення температури процесу призводить до зростання вмісту розчинних сухих речовин (РСР) у фінальних екстрактах. Відповідно до даних (табл. 4, 5), підвищення температури до 70°C є критичним для лютеїну та зеаксантину. Це пояснюється тим, що каротиноїди в рослинній клітині часто асоційовані з білками або ліпідами; тепловий вплив денатурує білки та знижує в'язкість внутрішньоклітинних ліпідів, полегшуючи дифузію цільових компонентів у розчинник.

У досліджуваному інтервалі температур, що охоплював зону інтенсифікації процесу ($60\text{--}70^\circ\text{C}$), спостерігалось монотонне збільшення виходу цільових ком-

понентів. Температура 70°C використовувалася суто для порівняльного кінетичного аналізу різних способів екстрагування та визначення параметрів математичної моделі. Водночас із позицій збереження біологічної активності каротиноїдів технологічно доцільним є проведення процесу за температур не вище за 60°C , що узгоджується з літературними даними щодо термостабільності лютеїну та зеаксантину.

Це явище зумовлене сукупною дією кількох факторів. По-перше, підвищення температури збільшує розчинність ліпофільних каротиноїдів (лютеїну, зеаксантину) та флавоноїдів у водно-етаноловому екстрагенті. По-друге, зростання температури супроводжується зменшенням в'язкості рідкої фази та збільшенням кінетичної енергії молекул, що призводить до зростання коефіцієнта внутрішньої дифузії D і, відповідно, прискорює перенесення речовини з твердої фази в рідку.

Висновки

1. Розроблено узагальнену математичну модель екстрагування біологічно активних речовин із лікарської рослинної сировини *Tagetes erecta* L. на основі інтегрального коефіцієнта масопередачі K , який є надійним критерієм оцінки кінетичної ефективності періодичних процесів.

2. Встановлено, що значення коефіцієнта масопередачі зростає у ряду: мацерація • дигерування • ремацерація • перколяція. За однакових умов експерименту значення K для мацерації становить $K_{\text{мац}} = 0,05 \text{ год}^{-1}$, тоді як для перколяції – $K_{\text{перк}} = 0,15 \text{ год}^{-1}$, що свідчить про трикратне зростання швидкості досягнення рівноважного стану через мінімізацію зовнішнього масообмінного опору.

3. Визначено вплив морфологічної структури фітосировини на коефіцієнт внутрішньої дифузії D , де найбільші значення зафіксовано для комбінованих фракцій *Tagetes erecta* L. Досліджено вплив температурного чинника: підвищення температури інтенсифікує масоперенесення, однак для збереження термолабільних каротиноїдів (зокрема, лютеїну) вста-

новлено верхню технологічну межу процесу на рівні 60 °C.

4. Практична цінність роботи полягає у тому, що отримані експериментальні та розрахункові кінетичні параметри (K , D) є базовими для інженерного розрахунку, масштабування й оптимізації промислових екстракторів у процесі вилучення каротиноїдних і флавоноїдних комплексів із сировини *Tagetes erecta* L.

ЛІТЕРАТУРА

- Karpyk H., Vichko O., Marchyshyn S., Slobodianiuk L., Budniak L., Shved O. The influence of the extract from the flowers on the *Tagetes patula* on the consumer properties of the buns products. *Phytotherapy. Journal*. 2024. № 4. P. 156–164. DOI: 10.32782/2522-9680-2024-4-156.
- Slobodianiuk L., Budniak L., Marchyshyn S., Kostyshyn L., Ezhne M. Determination of amino acids content of the *Tagetes lucida* Cav. by GC/MS. *Pharmacia*. 2021. № 68 (4). P. 859–867. DOI: 10.3897/pharmacia.68.e70444.
- Бердей Т. С., Марчишин С. М. Дослідження ліпофільної фракції рослин роду Чорнобривці (*Tagetes* L.). *Фармацевтичний часопис*. 2011. № 1 (17). С. 10–14.
- Вишневська Л. І. Технологічні дослідження лікарської рослинної сировини та її композиції у створенні нових препаратів. *Вісник фармації*. 2008. № 4. С. 33–38.
- Шостак Т. А., Калинюк Т. Г., Гудзь Н. І. Особливості фармацевтичної розробки рослинних препаратів. *Фітотерапія. Часопис*. 2014. № 4. С. 77–82.
- Berg J., Lin D. Lutein and zeaxanthin: a review of metabolism and eye health. *Journal of Human Nutrition and Food Science*. 2014. Vol. 2, № 4. P. 1039. DOI: 10.11648/j.jhnfs.20140204.11.
- Ionova-Doing E., Gisi P. G., Venturini K., Williams K. M., Nag A., Beatty S., et al. Candidate gene studies of macular response to lutein and zeaxanthin supplementation. *Experimental Eye Research*. 2013. Vol. 115. P. 172–177. DOI: 10.1016/j.exer.2013.07.019.
- Кисличенко В. С., Кузнецова В. Ю. Дослідження каротиноїдного складу квіток *Tagetes erecta* L. *Український біофармацевтичний журнал*. 2018. № 3 (56). С. 60–64. DOI: 10.24959/ubzh.18.174.
- Дехтерьова К. О., Горлачова В. І. Експериментальні дослідження з вибору оптимального екстрагента для визначення вмісту біологічно активних речовин в ЛРС. *Збірник наукових праць співробітників НМАПО імені П. Л. Шупика*. 2016. Вип. 26. С. 332–336.
- Peter T. V., Hymavathi V., Yasoda D. P. A study on the different methods of preparation of lutein from supercritical fluid processed lutein esters. *Journal of Nutrition & Food Sciences*. 2012. Vol. 2. P. 2–7. DOI: 10.4172/2155-9600.1000140.
- Silva L. M., Rodrigues M. A. Kinetic modeling of solid-liquid extraction of antioxidants from marigold (*Tagetes erecta*). *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 241. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116129.
- Марчишин С. М., Слободянюк Л. В., Будняк Л. І., Карпик Г. В., Вічко О. І. Дослідження біологічно активних речовин густого екстракту чорнобривців розлогих та використання його у хлібопекарному виробництві. *VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Стан і перспективи харчової науки та промисловості»*, ТНТУ імені Івана Пулюя, 25–26 вересня 2025 р. С. 20–25.
- Коновалова В. А., Касьянов Г. І., Данильченко С. В. та ін. Екстракційні технології у фармації : підручник. Київ : Наукова думка, 2021. 320 с.
- Бурдо О. Г., Terziiev C. Г. Кінетика масопереносу в технологіях екстрагування цільових компонентів із фітосировини. *Наукові праці ОНАХТ*. 2020. Вип. 84, Т. 1. С. 12–18.
- Мальований М. С., Дячок В. В. Екстрагування суміші рослинної сировини. Розрахунок процесу. *Хімічна промисловість України*. 2010. № 4. С. 17–21.
- Дячок В. В., Мальований М. С. Про вплив пресування на стан рівноваги при нетрадиційних випадках перебігу екстракційних процесів. *Вопросы химии и химической технологии*. 2009. № 4. С. 177–180.
- Сидорчук В. М., Іваненко О. П. Математичне моделювання біотехнологічних процесів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2022. 256 с.
- 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. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c00504.
- 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. Vol. 167. P. 113–125. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113125.
- Кравич А. С. Екстрагування біологічно активних речовин з біомаси *Gladiolus imbricatus* культивованої в умовах in vitro : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2016. 159 с.
- Patil P. D., Ghalas S. G. Kinetic and thermodynamic study of solid-liquid extraction of lutein from *Marigold* flowers. *Journal of Bioprocess Engineering and Biorefinery*. 2019. Vol. 8, Iss. 2. P. 145–153.
- Zhang J., Wen C. Kinetic modeling of bioactive compounds extraction: A review of the latest biotechnology applications. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 44. P. 1021–1035. DOI: 10.1007/s00449-021-02523-8.
- Світленка С. І. та ін. Біотехнологія БАР рослинного походження : монографія / за ред. С. І. Світленка. Київ : Наукова думка, 2021. 412 с.
- Zaitsev O. I. Mathematical modeling of extraction processes of biologically active substances from plant raw materials. *Food Science and Technology*. 2019. Vol. 13, № 2. P. 45–52. DOI: 10.15673/fst.v13i2.1387.

Zhang, J., & Wen, C. (2021). Kinetic modeling of bioactive compounds extraction: A review of the latest biotechnology applications. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44, 1021–1035. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02523-8>.

Svitlenko, S. I., et al. (Eds.). (2021). *Biotehnolohiia BAR roslynnoho pokhodzhennia: monohrafiia* [Biotechnology of BAS of plant origin: monograph]. Naukova Dumka [in Ukrainian].

Zaitsev, O. I. (2019). Mathematical modeling of extraction processes of biologically active substances from plant raw materials. *Food Science and Technology*, 13 (2), 45–52. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i2.1387>.

Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion* (2nd ed.). Clarendon Press.

Stadnyk, I., Piddubnyi, V., Kolomiets, O., Chahaida, A., Kravets, O., Fedoriv, V., Ieremeieva, O., Mihailik, V., Kravcheniuk, R., & Radchenko, I. (2025). Determining the influence of drum mixer parameters on the change in dough components concentration at the initial mixing stage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/11 (134), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.327160>.

Stadnyk, I., Piddubny, V., Kravchenko, M., Rybchuk, L., Kolomiets, O., & Danylo, S. (2020). Adhesion of marzipan pastes based on dry demineralized whey. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 1149–1160. <https://doi.org/10.5219/1351>.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2026

Стаття прийнята до друку 12.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 03.09.2026

Конфлікт інтересів: відсутній.

Внесок авторів:

Стадник І. Я. – ідея, написання статті, критичний огляд, остаточне затвердження статті;

Белова І. М. – збір та аналіз літератури, участь у написанні статті;

Чагайда А. О. – участь у написанні статті, коректування статті;

Грохольська Т. М. – збір та аналіз даних, участь у написанні статті, анотації;

Голячук С. Е. – збір та аналіз даних, критичний огляд, висновки;

Парубок М. І. – збір та аналіз даних, участь у написанні статті;

Михайлик В. С. – збір та аналіз даних, участь у написанні статті, коректування статті.

Електронна адреса для листування з авторами:

igorstadnykk@gmail.com