



UDC 536.2:66.011:664

HYBRID PROCESSES AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS AS A FACTOR IN THE INTENSIFICATION AND TRANSFORMATION OF CHEMICAL AND FOOD ENGINEERING: A SYSTEMATIC REVIEW

Michael A. Podzharsky

Oles Honchar Dnipro National University, 72, Gagarin Ave., Dnipro 49010, Ukraine

Received 2 March 2026; accepted 18 May 2026; available online 20 June 2026

Abstract

This article provides a systematic review of current trends in intensifying technological processes in chemical and food engineering. It focuses on hybrid methods of drying, separation, and extraction, which have been extensively studied in recent publications (2021–2026). These studies reveal interest in using nanofluids as heat transfer fluids, employing combined drying systems, using membrane-integrated reactors, and employing extraction technologies based on deep eutectic solvents. Combining physical effects (e.g., ultrasound, microwaves, radio frequencies, and magnetic fields) with traditional processes creates synergistic effects, including increased heat and mass transfer coefficients, reduced operation times, and preserved bioactive components. For instance, energy consumption in combined drying units is reduced by tens of percent compared to conventional units, while product quality is preserved. Membrane-integrated reactors and process systems using deep eutectic solvents show promise, though long-term stability and safety must be confirmed. After summarizing the discussed material, the author proposed a simple classification of hybrid heat and mass transfer processes, which improves understanding of the subject.

Keywords: chemical engineering; food engineering; chemical technology; food technology; heat transfer; mass transfer; hybrid processes; hybrid systems; synergistic effect; synergy; process intensification; project design; artificial intelligence.

ГІБРИДНІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ЯК ФАКТОР ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ ХІМІЧНОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ІНЖЕНЕРІЇ: СИСТЕМНИЙ ОГЛЯД

Михайло А. Поджарський

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, просп. Науки, 72, Дніпро, 49010, Україна

Анотація

Стаття присвячена систематичному огляду сучасних напрямів інтенсифікації технологічних процесів у хімічній та харчовій інженерії. Особливу увагу приділено гібридним методам сушіння, розділення та екстракції, які активно досліджуються в публікаціях останніх років (2021–2026). У цих роботах простежується інтерес до нанофлюїдів як теплоносіїв, комбінованих сушильних систем, мембранно-інтегрованих реакторів та екстракційних технологій на основі глибоких евтектичних розчинників. Поєднання фізичних впливів (ультразвук, мікрохвилі, радіочастоти, магнітні поля) з традиційними процесами створює синергетичні ефекти, що проявляються в зростанні коефіцієнтів тепло- та масообміну, скороченні тривалості операцій та збереженні біоактивних компонентів. Так, у комбінованих сушильних установках споживання енергії знижується на десятки відсотків порівняно з звичайними, одночасно якість продуктів зберігається. Мембранно-інтегровані реактори та технологічні системи з використанням глибоких евтектичних розчинників вважаються перспективними, хоча потребують додаткового підтвердження довготривалої стабільності та безпечності. Узагальнивши розглянутий матеріал, автор запропонував просту класифікацію гібридних процесів тепло- та масоперенесення, корисну для кращого розуміння проблематики.

Ключові слова: хімічна інженерія; харчова інженерія; хімічна технологія; харчова технологія; теплообмін; масообмін; гібридні процеси; гібридні системи; синергетичний ефект; синергія; інтенсифікація процесів; проектування; штучний інтелект.

*Corresponding author: e-mail: podzharsky@ua.fm

© 2026 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v34i2.359137

Вступ

Хімічна інженерія поєднує термодинаміку, гідродинаміку та закономірності перенесення для розв'язання виробничих задач. З часом ці підходи перейшли й у харчові технології, але там вони працюють у складніших умовах – із багатофазними, біологічно активними та нестабільними системами. Харчова інженерія фактично пристосовує класичні принципи до роботи з мінливим «живим» матеріалом. Якщо в хімічній інженерії домінує стандартизація, то харчова враховує біологічну природу сировини, її сезонність і взаємодії компонентів.

Нині хімічна та харчова інженерія зближуються. Цифрові інструменти та гібридні процеси ведуть до появи компактних і більш ощадних виробництв. Це дає змогу поєднати точність хімічних розрахунків із чутливістю до біологічних властивостей сировини: перша отримує нові засоби оптимізації, друга – кращі умови для збереження біоактивних речовин. Водночас обидві галузі змінюються в бік інтенсифікації, зокрема через поєднання традиційних методів із фізичними впливами – мікрохвилями, ультразвуком, радіочастотним нагріванням та застосуванням гібридних нанофлюїдів [1–3].

Концепція інтенсифікації процесів полягає не лише в впровадженні окремих інженерних розробок, а в комплексному підході до проектування технологічних рішень. Використання методів багатоцільової оптимізації та еволюційних алгоритмів у складних середовищах моделювання дозволяє досягати нелінійного зростання продуктивності завдяки синергетичним ефектам [4; 5]. Саме така інтеграція визначає нові горизонти розвитку як хімічної технології, так і харчової, роблячи їх взаємопов'язаними складникам сучасної інженерної науки.

Мета дослідження – узагальнити наукові результати останніх років про гібридні процеси й технологічні рішення в хімічній та харчовій інженерії, видокремити ключові синергетичні механізми та технологічні зрушення.

Методика дослідження

В роботі використано онлайн-інструмент на основі штучного інтелекту Google NotebookLM: він допоміг відібрати релевантні джерела, виконати їх первинний аналіз і підготувати чернетки тексту. Остаточний зміст,

інтерпретацію результатів, критичний аналіз, перевірку даних і формулювання висновків виконав автор.

Методика пошуку джерел базувалася на принципах систематичного *scoping*-огляду та була спрямована на вивчення обсягу, характеру й спрямованості досліджень у галузі інноваційного тепломасообміну та мембранного розділення. Пошук здійснювався в базах Scopus, Web of Science та Google Scholar за період 2021–2026 років.

Дослідження зосереджене на виявленні ключових концепцій, теорій і технологічних проривів – від фундаментальних механізмів інтенсифікації до промислового використання гібридних систем у хімічній та харчовій інженерії.

Пошукові запити формували за ключовими словами, що відповідають чотирьом напрямкам інтенсифікації: структура, енергія, синергія, час. Приклади запитів:

- *Process intensification heat and mass transfer*
- *Hybrid nanofluids heat transfer enhancement*
- *Ultrasonic assisted extraction deep eutectic solvents*
- *CFD simulation thermal processes food industry*
- *Hybrid methods separation distillation pervaporation*

Критерії включення:

- тематична релевантність: дослідження, що фокусуються на інтенсифікації процесів (PI) та створенні нових вікон процесів;
- тип публікацій: рецензовані статті, огляди, матеріали конференцій, монографії;
- інноваційність: пріоритет надавався гібридним методам, що поєднують різні фізичні впливи (наприклад, мікрохвилі + вакуум, ультразвук + ферменти);
- практичне значення: наявність даних про енергоефективність, екологічну стійкість та якість продукції.

Критерії виключення:

- матеріали стосувалися виключно медичних аспектів (наприклад, ультразвукова діагностика) без інженерно-хімічного контексту;
- дослідження не містили кількісних показників ефективності або описів механізмів перенесення;
- були доступні лише анотації без можливості верифікації методології;

– матеріали, що походили з Російської Федерації та республіки Білорусь.

Процес відбору джерел відповідав протоколам PRISMA та включав чотири послідовні етапи:

1. Ідентифікація: пошук у базах даних (*Scopus, Web of Science та Google Scholar*) з залучанням допоміжних джерел і інструментів пошуку (*ResearchGate, PMC, MDPI, Semantic Scholar*).

2. Скринінг: оцінка назв та анотацій на відповідність ключовим напрямом (обладнання, енергія, методологія, робочі середовища).

3. Оцінка відповідності: аналіз текстів для визначення проблематики синергетичних ефектів та точності математичного моделювання (CFD, критеріальні рівняння).

4. Синтез: групування джерел за стратегічними напрямом інтенсифікації та формування узагальнених висновків щодо майбутніх трендів розвитку галузі до 2026 року.

Первинний пошук за зазначеними критеріями виявив 789 літературних джерел, з яких як найбільш релевантні відібрані 32.

Результати та їх обговорення

Принципи інтенсифікації процесів

Інтенсифікація технологій у хімічній та харчовій інженерії ґрунтується на кількох взаємопов'язаних підходах.

По-перше, акцент робиться на динамічному керуванні умовами, яке дозволяє прискорювати внутрішньо- та міжмолекулярні перетворення, забезпечуючи високий ступінь конверсії та селективності [4].

По-друге, важливим є створення однорідного середовища для кожної молекули («uniform process experience»), що реалізується в апаратах із точним контролем градієнтів [4].

Третій напрям – оптимізація рушійних сил і поверхонь тепломасообміну, зокрема через мікроканалні та структуровані системи, які забезпечують ефективне використання енергії [2; 4].

Нарешті, ключовим стає посилення синергетичних ефектів шляхом інтеграції кількох процесів в одному апараті – приклади включають, комбіноване сушіння, реактивну дистиляцію чи мембранні реактори, в яких поєднуються реакція та сепарація [4; 6; 7].

Гібридні процеси та технологічні рішення

Гібридні процеси – це комплексні фізико-хімічні явища, в яких одночасно реалізуються кілька механізмів перенесення (тепла, маси, імпульсу) та/або протікають хімічні реакції під дією поєднаних фізичних полів різної природи (акустичного, електромагнітного, електричного, механічного тощо). Їхня взаємодія приводить до виникнення синергетичних ефектів, що проявляються в нелінійній інтенсифікації кінетики перенесення та реакційних перетворень, і, як наслідок, до підвищення ефективності технологічних процесів.

Гібридні технологічні рішення – це інженерна реалізація гібридних процесів у формі інтегрованих технологічних систем, що поєднують апаратурні конструкції, режими обробки, фізичні поля та функціональні робочі середовища (зокрема гібридні дисперсні системи, такі як нанофлюїди). Така інтеграція забезпечує керований вплив на механізми тепло- та масоперенесення і, за необхідності, на кінетику хімічних реакцій, що дозволяє досягати підвищених показників ефективності.

В даній роботі застосовано спільний розгляд гібридних процесів і гібридних технологічних рішень, що є методологічно обґрунтованим, оскільки поєднує опис механізмів інтенсифікації з їх інженерною реалізацією.

Гібридні нанофлюїди: моделювання та експерименти

Нанофлюїди (HNF) – сьогодні найбільш перспективні види теплоносіїв. Їх використовують для інтенсифікації теплообміну завдяки значно вищій теплопровідності порівняно зі звичайними рідинами. Дослідження останніх років щодо їх різновиду – гібридних нанофлюїдів – демонструють, що поєднання різних типів наночастинок створює синергетичні ефекти, які забезпечують теплопровідність і стабільність, недосяжні для класичних однокомпонентних HNF [1; 8; 9]. У центрі уваги перебувають вплив морфології частинок, зовнішніх полів та енергетичних параметрів на процеси тепло- та масообміну [10; 11].

Морфологічні фактори. Встановлено, що форма наночастинок суттєво визначає інтенсивність перенесення. Лопаткоподібні (blade) та пластинчасті (platelet/lamina) наночастинок найчастіше дають найвищий коефіцієнт тепловіддачі, в той час як сферичні частинки зазвичай дають мінімальне

підсилення теплопереносу, але сприяють нижчій в'язкості, що іноді знижує опір [10]. Моделювання таких систем враховує ефекти термофорезу, броунівського руху та генерації тепла [10].

Магнітогідродинамічні ефекти. Використання магнітних полів дозволяє керувати профілями швидкості та температури без механічного втручання. Збільшення параметра поля приводить до зростання локальних чисел Нуссельта та Шервуда [11]. Водночас інтенсифікація супроводжується генерацією ентропії, що потребує балансу між продуктивністю та термодинамічною ефективністю. Сучасні моделі враховують нелінійні реакції систем на зміни магнітного та теплового середовища,

включно з ефектами в'язкої дисипації та джоулевого нагріву [11].

Трикомпонентні системи (THNF) демонструють приріст теплоперенесення на 15–20 % порівняно з двокомпонентними HNF [9]. Це пояснюється складними міжчастинковими взаємодіями, що створюють додаткові мікропотоки та підвищують ефективну теплопровідність базової рідини.

Виклики. Попри очевидні переваги нанофлюїдів, залишаються проблеми, пов'язані з недостатньою стабільністю дисперсій, агломерацією частинок та обмеженою передбачуваністю властивостей при масштабуванні до промислових умов [1; 8; 9; 11].

Table 1

Nanofluids: Key Properties and Effects

Таблиця 1

Нанофлюїди: ключові властивості та ефекти

Параметр нанофлюїду	Вплив на теплообмін	Вплив на масообмін	Стабільність
Концентрація частинок	Лінійне зростання до межі агломерації	Залежить від градієнта концентрації	Знижується при високих концентраціях
Форма частинок	Підвищення на 14 %	Помірне зростання	Висока при правильному рН
Реагування на магнітне поле	Значне зростання при високих градієнтах	Посилення через вторинні токи	Можлива седиментація частинок
Вплив на енергію активації процесу	Помірний вплив	Скорочення дифузійного шару на 9 %	Без змін

Інтенсифікація процесів сушіння: сучасні тенденції

Сушіння залишається однією з найбільш енергоємних операцій харчових та хімічних технологій, на яку припадає до 20 % промислового споживання енергії [3]. У цьому контексті гібридизація методів, що поєднують конвективне, кондуктивне та випромінювальне підведення тепла, розглядається як стратегія радикального вдосконалення кінетики видалення вологи.

Конвективно-інфрачервоні методи. Дослідження українських інститутів (Інституту технічної теплофізики НАН України та НУХТ) показали, що комбіноване застосування ІЧ-випромінювання та конвекції значно – на 30–40 % – скорочує тривалість сушіння грибів шіітак порівняно з традиційним конвективним методом. Важливим індикатором є число Ребіндера, яке різко зростає під час зниження вологості до 10 %, сигналізуючи про ризик перегріву продукту. Щоб уникнути цього, достатньо зменшити інтенсивність енергопідводу після досягнення температури 50 °C [12].

Мікрохвильово-вакуумні та радіочастотні методи. Мікроволнове вакуумне сушіння яблук підвищує об'єм продукту на 9–51 % проти сушіння гарячим повітрям, забезпечує пористу структуру й кращу регідратацію, за питомої потужності 4,5 W/g вміст загального фенолу і антиоксидантність зростають у 1,7–2 рази, вітаміну С – в 2.27 рази [13]. Ефективний коефіцієнт дифузії вологи в таких системах майже на порядок вищий, ніж у традиційних сушарках. Під час сушіння моркви інтеграція радіочастотного нагрівання з конвекцією скорочує тривалість процесу до 30 %, що свідчить про значне прискорення теплоперенесення внаслідок об'ємного електромагнітного нагріву. [14].

Фільтраційне та бункерне сушіння. Для дисперсних матеріалів, таких як біомаса чи промислові напівфабрикати, ключовим чинником є зовнішній теплообмін між теплоносієм та нерухомим шаром. У діапазоні чисел Рейнольдса 200–500 коефіцієнт тепловіддачі прямо залежить від швидкості фільтрації газу, що відкриває можливості для оптимізації енерговитрат шляхом точного налаштування вентиляції [15]. У випадку

великих масивів зерна в бункерних сушарках вирівнюють температурні поля та знижують ефективність сушіння підвищується завдяки ризик локального перегріву, критичного для циклічно-періодичним режимам, які збереження насінневих якостей [16].

Table 2

Hybrid drying processes

Таблиця 2

Гібридні процеси сушіння

Метод сушіння	Об'єкт дослідження	Інтенсифікація (час)	Енергоефективність	Якість продукту
Інфрачервоне випромінювання + конвекція	Гриби шіітаке	1.4–1.6 рази	Висока (низьке Rb)	Високий коеф. набухання
Мікрохвильове випромінювання + конвекція	Яблука	Час сушки різко скорочується у міру збільшення мікрохвильової потужності	Енергоефективність пов'язана зі зростанням якості продукту	Збільшення вмісту вітаміну С в 2.27 рази
Радіочастотне випромінювання + конвективне сушіння	Морква	30–43 %	Температура і швидкість сушильного повітря 45 °C і 2,5 м/с, потужність РЧ 1,5 кВт	Покращена структура
Сонячні гібридні системи сушіння	Лікарські трави	66.7 %	Відновлювані джерела енергії	Підвищення споживацьких характеристик

Гібридні сепараційні та реакційні процеси

Один з сучасних напрямів – інтеграція класичної дистиляції з мембранними технологіями та реакційними системами. Такі гібридні рішення дозволяють інтенсифікувати технологічні процеси шляхом подолання термодинамічних обмежень – зокрема азеотропних точок. [17, 18].

Дистиляція та первапорація. В випадку систем *n*-пропанол–вода традиційна дистиляція потребує використання розділювальних агентів. Гібридна схема «дистиляція + гідрофільна первапорація» (D+HPV) дозволяє отримувати чистий продукт без сторонніх реагентів. Дослідження показали, що таке поєднання знижує річні витрати майже на 38 % порівняно з базовим варіантом [17; 18]. Важливо, що первапорація передбачає фазовий перехід лише для частки компонентів, які проходять крізь мембрану, що зменшує енергоспоживання приблизно на 50 % у порівнянні з повною дистиляцією [6].

Мембранно-інтегровані реактори. Використання мембран безпосередньо в реакційній зоні створює умови для зміщення рівноваги оборотних реакцій, наприклад естерифікації, завдяки безперервному видаленню води. Це не лише підвищує конверсію, але й дозволяє проводити процеси за нижчих температур (50–80 °C), що є оптимальним для ферментативного каталізу ліпазами [6]. Подвійна функціональність

мембран – селективне розділення та каталітична активність – окреслює перспективний напрям розвитку технологій синтезу складних ефірів і біодизеля [6].

Синергетичні механізми в екстракції та розчиненні

Сучасні дослідження екстракційних процесів демонструють, що обмеження, пов'язані з низькою швидкістю дифузії крізь щільні рослинні матриці, можуть бути подолані завдяки інтеграції фізичних та біохімічних методів. Поєднання ультразвукового впливу з ферментативною обробкою (UAEE) та використанням глибоких евтектичних розчинників (DES) створює виражений синергетичний ефект, що надає принципово нові можливості для отримання біологічно активних речовин [7; 19].

Ультразвуково-ферментативні системи. Хоча ультразвук не змінює гідроліз чистих субстратів (очищений пектин), він істотно прискорює деградацію складних біоматриць (яблучний жом, цитрусова шкірка) завдяки кавітаційному руйнуванню клітинних структур і стимуляції вивільнення природних кофакторів (іонів кальцію та калію), що підсилює дію ферментів [19]. У випадку екстракції фенольних кислот із лікарських рослин (*Lonicera japonica*, *Paederia scandens*) застосування TDES у поєднанні з ультразвуком забезпечує значне скорочення часу екстракції – від годин до десятків хвилин. Ультразвуково-асистована екстракція продемонструвала

найвищі значення сумарного вмісту окремих поліфенольних сполук, загального вмісту флавоноїдів та антиоксидантної здатності, пов'язаної з відновленням заліза. Як показали електронно-мікроскопічні дослідження, це є результатом гібридного впливу, який викликає інтенсивне руйнування клітинних стінок [7; 20].

Розчинення твердих гранул. У фармацевтичних та косметичних виробництвах масообмін внаслідок механічного перемішування в системі «тверде тіло–рідина» є критичним фактором. Результати експериментів свідчать, що підвищення швидкості перемішування та температури значно прискорює розчинення гранул тетраборату натрію діаметром 20 мм. Домінантним чинником є температура, яка одночасно підвищує розчинність і коефіцієнт дифузії. Математичні моделі, побудовані на основі критеріїв Шервуда, Рейнольдса та Шмідта, демонструють високу точність прогнозування (похибка < 6 %), що робить їх придатними для проектування промислових реакторів [21; 22].

Гідродинамічна інтенсифікація в багатофазних системах

Одним із ключових чинників ефективності гібридних процесів є створення специфічних гідродинамічних режимів – пульсуючих

потоків або кавітаційних полів [2; 23]. Саме вони визначають можливість інтенсифікації тепло- і масообміну та забезпечують нові сценарії взаємодії фаз.

Дискретно-імпульсне підведення енергії знаходить застосування в процесах гідратації, гідролізу та екстракції. Термодифузійні методи, що поєднують фільтрацію екстрагента через шар сировини з осцилюючим температурним режимом, створюють умови для одночасного прискорення зовнішнього масообміну (завдяки змінам швидкості потоку) та внутрішнього (через температурні коливання). Це дозволяє досягати глибокого вилучення біологічно активних речовин без ризику термічної деструкції [24].

Кавітаційні ефекти, спричинені проходженням акустичних хвиль крізь рідину, формують локальні «гарячі точки» з надзвичайно температурою 727–9727 °C і тиском 100–5000 бар [2]. Вони стимулюють генерацію вільних радикалів та мікротурбулентність, що суттєво прискорює перебіг гомогенних і гетерогенних реакцій. У практиці гомогенізації та диспергування кавітація дозволяє досягати ступеня подрібнення в 2–3 рази вищого, ніж за традиційних механічних методах, без додаткових енергетичних витрат [23].

Table 3

Physical effects and hydrodynamic mechanisms of intensification

Таблиця 3

Фізичні впливи та гідродинамічні механізми інтенсифікації

Фізичний вплив	Гідродинамічний ефект	Застосування	Синергетичні ефекти
Ультразвукова кавітація	Мікрострумені, ударні хвилі	Екстракція, гомогенізація	Руйнування приграничних шарів
Пульсуюча флюїдизація	Неоднорідний контакт фаз	Грануляція добрив	Запобігання агломерації
Механічне змішування	Газорідинна аерація	Харчові піни, тісто	Формування мікроструктури
Магнітне поле	Керування вектором швидкості	Нанофлюїдні охолоджувачі	Дистанційний контроль потоку

Цифрове моделювання та оптимізація гібридних систем

В умовах «четвертої промислової революції» розвиток хімічної та харчової інженерії неможливий без цифрових інструментів для моделювання складних взаємодій у багатофазних системах та оптимізація гібридних систем.

CFD та багатофазні моделі. Обчислювальна гідродинаміка (CFD) стала базовим інструментом для аналізу розподілу потоків газів і рідин у промислових апаратах. Використання моделей RANS дозволяє

досліджувати турбулентність і теплопередачу в неоднорідних харчових масах – від випікання хліба до виробництва шоколаду – забезпечуючи рівномірність нагріву та стабільність якості продукту [25]. У складних системах, зокрема грануляторах із псевдозрідженим шаром, CFD допомагає ідентифікувати застійні зони та області інтенсивного тепломасообміну, що відкриває шлях до оптимізації конструкцій газорозподільчих пристроїв [24; 26].

Машинне моделювання та інтелектуальний контроль. Паралельно з CFD

зростає роль інтегрованих підходів, що поєднують методи планування експерименту (RSM), штучні нейронні мережі (ANN) та генетичні алгоритми (GA). Така комбінація дозволяє будувати моделі для складних нелінійних процесів, де класичні рівняння втрачають ефективність [7]. Показовим прикладом є використання ANN-GA для екстракції фенолів: інтеграція цих методів дала змогу знайти глобальний оптимум з урахуванням п'яти параметрів – потужності ультразвуку, часу, температури, складу розчинника та співвідношення фаз [7].

Екологічні та економічні аспекти впровадження гібридних процесів

Гібридизація технологій наразі є стратегічним інструментом для раціонального використання ресурсів та досягнення вуглецевої нейтральності. Її впровадження формує нові економічні моделі виробництва, де екологічна ефективність і фінансові вигоди тісно пов'язані між собою.

Декарбонізація. Використання сонячних гібридних систем сушіння (HSDS) в агропромисловості дозволяє відмовитися від викопного палива, а також створює додатковий економічний стимул у вигляді карбонових кредитів (≈1321\$ за 20 років експлуатації однієї установки) [27].

Енергозбереження. Інтеграція теплових потоків у мембранно-дистиляційні схеми сприяє зниженню викидів CO₂ без втрати

чистоти кінцевого продукту, що робить такі системи конкурентними як з погляду екології, так і з економіки [17].

Зменшення відходів. «Зелені» методи екстракції, що поєднують ультразвуковий вплив із застосуванням глибоких евтектичних розчинників (DES), мінімізують використання токсичних органічних розчинників. Це не лише знижує екологічні ризики, але й підвищує безпечність виробництва біоактивних добавок [28].

Таким чином, гібридні процеси як інструмент трансформації промисловості надають можливості одночасно досягати екологічної безпеки, економічної ефективності та технологічної інноваційності.

Узагальнення

Проаналізований у цьому огляді матеріал про гібридні процеси тепло- і масообміну відрізняється різноманіттям, тому для кращого розуміння проблематики потрібна його систематизація. Пропонується проста класифікація енергетичних впливів за типом підведеної енергії та механізмом інтенсифікації (таблиця 4) та систематизація гібридних процесів тепло- та масообміну за методами, механізмами та результатами (таблиця 5). Треба брати до уваги, що синергетичний ефект виникає шляхом одночасного впливу на різні лімітувальні стадії процесу (дифузія, теплоперенесення, внутрішньоклітинний опір).

Table 4

Classification of energy effects based on the method of energy delivery and the intensification mechanism

Таблиця 4

Класифікація енергетичних впливів відповідно до способу підведення енергії та механізму інтенсифікації

За типом підведеної енергії		За механізмом інтенсифікації	
Тип енергії	Процеси	Механізм	Ефекти
Механічна	Гідродинамічна гомогенізація, інтенсивне перемішування, турбулізація потоку	Гідродинамічний ефект	Руйнування прикордонного шару, турбулізація
Акустична	Ультразвук, акустична кавітація, високочастотні вібрації	Структурно-мембранний ефект	Підвищення проникності клітин (електропорація, кавітація)
Електромагнітна	Мікрохвильове, радіочастотне, інфрачервоне випромінювання, лазерна обробка	Термічний ефект	Об'ємний або локальний нагрів, у т.ч. селективний
Електрична	Імпульсне електричне поле, омичний нагрів	Фазово-структурні зміни	Утворення пор, мікротріщин, капілярів
Теплова	Конвективний, контактний, вакуумний нагрів (базові або комбіновані методи)	Кавітаційний ефект	Локальні імпульси, мікрострумені, інтенсифікація масоперенесення

Systematization of hybrid heat and mass transfer processes: methods, mechanisms, and results

Таблиця 5

Систематизація гібридних процесів тепло- та масообміну: методи, механізми та результати

Процес	Базовий метод	Гібридне посилення	Ефект
Ультразвук + мікрохвилі (сушіння)	Конвективне або вакуумне сушіння	Кавітація + об'ємний надвисокочастотний нагрів	Скорочення часу сушіння (до 50–80%), підвищення швидкості масоперенесення
Ультразвук + мікрохвилі (екстракція)	Конвективна/дифузійна екстракція	Синергія кавітації та діелектричного нагріву	Зростання виходу екстракту (30–80 %), зниження тривалості
Імпульсне електричне поле + ультразвук	Електропорація	Кавітаційне руйнування клітин	Підвищення проникності та інтенсифікація масоперенесення
Радіочастотний нагрів + конвекція	Конвективне сушіння	Об'ємний нагрів	Зменшення температурних градієнтів, прискорення сушіння
Ультразвук + вакуум	Вакуумне сушіння	Кавітація при зниженому тиску	Інтенсифікація видалення вологи при низьких температурах
Мікрохвилі + вакуум	Вакуумне сушіння	Об'ємний надвисокочастотний нагрів	Прискорене сушіння, покращення якості термолабільних продуктів
Імпульсне електричне поле + екстракція	Дифузійна екстракція	Електропорація	Підвищення виходу та швидкості екстракції

Виклики

Масштабування. Складність гібридних технологічних рішень полягає, крім іншого, в труднощах забезпечення рівномірного розподілу фізичних полів по об'єму апарата. Це певною мірою ускладнює масштабування до промислового рівня.

Енерговитрати. Деякі гібридні технології потребують підвищених витрат енергії (ультразвук, мікрохвилі), що може знижувати економічну ефективність.

Нерівномірність обробки. Гібридні процеси часто ведуть до нерівномірності обробки матеріалів, що, наприклад, характерно для електромагнітних полів (локальні перегріву, гарячі точки).

Деградація продукту. Локальні екстремальні умови, які створюють деякі впливи (ультразвукова кавітація, високочастотне електричне поле), можуть викликати деградацію біологічно активних компонентів та зниження якості продукту.

Тенденції розвитку

Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання в гібридні технологічні рішення дає якісно нові можливості для прогнозування кінетики процесів, підвищення енергоефективності та подальшої оптимізації.

Інтелектуальне керування режимами (adaptive processing). Адаптивні алгоритми та методи штучного інтелекту, що керують гібридними процесами мають можливість

оптимізувати їх хід у реальному часі, забезпечити низьке енергоспоживання та високу якість продукції.

Інтеграція з відновлюваними джерелами енергії (гібридні сушарки, екстракційні системи з сонячною енергією) забезпечує екологічну ефективність, зниження емісії вуглецю та економічні переваги.

Висновки

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що гібридні процеси та технологічні рішення, в основі яких лежить синергія різних фізичних явищ і механізмів впливу, становлять один із найбільш результативних напрямів сучасної хімічної та харчової інженерії. Їхня перевага полягає у здатності одночасно впливати на кілька лімітуючих стадій процесу, що забезпечує нелінійне зростання ефективності, завдяки інтенсифікації перенесення, скорочення часу обробки, зниження в цілому витрат енергії та підвищення якості кінцевої продукції [29–31].

У галузі харчових технологій дуже важливі гібридні режими сушіння. Вони забезпечують як прискорення процесу, так і збереження термолабільних речовин. Найбільш перспективними вважаються вакуумно-мікрохвильові, інфрачервоні та комбіновані схеми, пристосовані для обробки сировини, що чутлива до температури.

У хімічних технологіях у пріоритеті апарати з безперервними потоками та гібридні рішення, що забезпечують високу керованість, відтворюваність та безпечність процесів. Для сепараційних процесів перспективні гібридні системи дистиляції та первапорації, які дозволяють поліпшити економічні показники виробництва [30–32].

Отже, розвиток гібридних процесів та технологічних рішень наразі виступає як практичний напрям модернізації виробництва. Для українських науковців та інженерів найсильніша стратегія притримуватись децентралізованого підходу – працювати в нішах, де потрібні невеликі пілотні установки, а не повномасштабні капіталомісткі лінії. Це важливо для сушіння агропродукції, екстракції біоактивних сполук із відходів агропереробки, а також енергомодернізації існуючих виробництв.

Практичні рекомендації

Перспективними слід вважати дослідження, спрямовані на прикладні напрями, що демонструють найбільший потенціал технологічного прориву:

- гібридні режими сушіння харчової сировини з контрольованим балансом теплових потоків;

- екстракція в поєднанні з ультразвуковим впливом і використанням глибоких евтектичних розчинників як альтернативи органічним системам;

- мембранно-інтегровані схеми розділення, здатні обходити азеотропні обмеження та знижувати енергоспоживання.

Експериментальні дослідження слід планувати так, щоб разом із виходом продукту визначати питомі витрати енергії, швидкості процесів, селективність, стабільність параметрів системи, а також ймовірність збереження функціональних властивостей. Це дозволить визначити межі масштабування отриманих результатів.

В ході інженерного впровадження необхідно триматися послідовної схеми: лабораторні випробування → обов'язкове CFD-моделювання з оптимізацією технологічних рішень → відпрацювання на пілотному обладнанні. Це критично для складних безперервних і мембранно-інтегрованих систем, де ефективність визначається гідродинамікою та геометрією апаратів.

Заява про використання штучного інтелекту

Під час підготовки цієї роботи для збору та попереднього аналізу даних, а також для формулювання чорнового варіанту тексту автор використовував онлайн-інструмент на основі штучного інтелекту *Google NotebookLM*. Остаточний зміст, інтерпретація результатів, критичний аналіз та верифікація для забезпечення точності, релевантності та відповідності академічним стандартам, а також наукові висновки належать автору, який несе повну відповідальність за точність і добросовісність представленої інформації. Використання AI розкрито відповідно до принципів наукової прозорості та академічної добросовісності.

Скорочення

ANN – Artificial Neural Networks – штучні нейронні мережі.

CFD – Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка.

DES – Deep Eutectic Solvents – глибокі евтектичні розчинники – екологічні, біорозкладні суміші, що утворюють рідку фазу при температурах значно нижчих, ніж окремі компоненти.

GA – Genetic Algorithms – генетичні алгоритми – евристичні алгоритми пошуку, які використовуються для розв'язання задач оптимізації та моделювання.

HNF – Hybrid Nanofluids – гібридні нанофлюїди – нове покоління теплоносіїв, які являють собою базову рідину з диспергованими у ній наночастинками двох або більше типів (металів, оксидів металів, вуглецевих нанотрубок, графена).

HSDS – Hybrid Solar Drying Systems – сонячні гібридні системи сушіння – сушильні системи, що використовують комбінації сонячного випромінювання з додатковими джерелами енергії.

RANS – Reynolds-Averaged Navier–Stokes – рівняння Нав'є-Стокса, що усереднені за Рейнольдсом, наразі є основним методом у CFD для моделювання турбулентних потоків.

RSM – Response Surface Methodology – методологія поверхні відгуку – сукупність математичних і статистичних методів для аналізу, моделювання та оптимізації процесів, яка ураховує визначену кількість вхідних факторів.

TDES – Ternary Deep Eutectic Solvents – тернарні глибокі евтектичні розчинники –

вдосконалена форма звичайних глибоких евтектичних розчинників (DES), які складаються не з двох, а з трьох компонентів.

TNNF – Ternary Hybrid Nanofluids – тернарні гібридні нанофлюїди – гібридні нанофлюїди, що складаються з базової рідини (води, етиленгліколю або олії), у якій дисперговані наночастинки трьох різних матеріалів.

References

- [1] Scott, T. O., Ewim, D. R. E., Eloka-Eboka, A. C. (2022). *Hybrid nanofluids flow and heat transfer in cavities: A technological review. International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 1104–1123. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac093>
- [2] Arya, S. S., More, P. R., Ladole, M. R., Pegu, K., Pandit, A. B. (2023). Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106504. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106504>.
- [3] Mujumdar, A. S., Devahastin, S., Shirkole, S. S. (2025). Impact of drying technology on stimulating academic and industrial R&D on a global scale. *Drying Technology*, 44(1), 1–3. <https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2600254>.
- [4] Haase, S., Tolvanen, P., Russo, V. (2022). Process intensification in chemical reaction engineering. *Processes*, 10(1), 99. <https://doi.org/10.3390/pr10010099>.
- [5] Arteaga-Cabrera, E., Ramírez-Márquez, C., Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J. G., Osorio-Mora, O., Gómez-Salazar, J. R. (2025). Advancing optimization strategies in the food industry: From traditional approaches to multi-objective and technology-integrated solutions. *Applied Sciences*, 15(7), 3846. <https://doi.org/10.3390/app15073846>.
- [6] Hoff, K. L., Eisenacher, M. (2025). Process intensification strategies for esterification: Kinetic modeling, reactor design, and sustainable applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(15), 7214. <https://doi.org/10.3390/ijms26157214>.
- [7] Liu, C., Zhao, Q., Ma, X., He, C., Zou, X., Gong, F., Liu, Y., Lei, J., Xiong, Z., Liu, J. (2026). Novel green solvent-in situ ultrasound synergistic extraction of phenolic acids from *Lonicera japonica* Thunb. *Ultrasonics Sonochemistry*, 127, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2026.107779>
- [8] Vallejo, J. P., Prado, J. I., Lugo, L. (2021). Hybrid or mono nanofluids for convective heat transfer applications: A critical review of experimental research. *Applied Thermal Engineering*, 203, 117926. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117926>.
- [9] Nagaraja, K. V., Khan, U., Madhukesh, J. K., Hassan, A. M., Prasannakumara, B. C., Kahla, N. B., Elattar, S., Chohan, J. S. (2023). Heat and mass transfer analysis of assisting and opposing radiative flow conveying ternary hybrid nanofluid over an exponentially stretching surface. *Scientific Reports*, 13, 14795. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41916-6>.
- [10] Asmadi, M. S., Siri, Z., Kasmani, R. M., Saleh, H. (2022). Nanoparticle shape effect on the natural-convection heat transfer of hybrid nanofluid inside a U-shaped enclosure. *Thermal Science*, 26(1 Part B), 463–475. <https://doi.org/10.2298/TSCI200818139A>.
- [11] Kumar, A., Singh, S., Tailor, T. (2025). Heat and mass transfer in hybrid nanofluids with MHD and entropy effects. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(23), 3821–3830. <https://doi.org/10.64252/9qm3n935>.
- [12] Sniezkin, Y., Petrova, Z., Bessarab, J., Samoilenko, K., Grakov, D., Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*). *Ukrainian Food Journal*, 12(3), 444–457. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-10>.
- [13] Bulantekin, Ö., Kuşçu, A. (2024). *Evaluation of microwave vacuum drying combined with explosion puffing drying and compared with microwave vacuum drying and hot-air drying by the quality of the dried apple slices. Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2404699. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2404699>.
- [14] Duc, L. A., Kien, P. V., Tan, N. T., Son, D. T., Nguyen, N. V., & Nguyen, N. X. (2023). Heat and mass transfer in drying of carrot by radio frequency assisted heat pump drying. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 20, 1–6. <https://doi.org/10.5098/hmt.20.25>.
- [15] Kuzminchuk, N., Atamanyuk, V. (2025). Heat transfer process during filtration drying of match splints. *Environmental Problems*, 10(1), 72–78. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.072>.
- [16] Kotov, B., Voitiuk, V., Kalinichenko, R., Stepanenko, S., Kuzmych, A. (2025). Mathematical modelling and investigation of the grain drying process in bunker units with radial supply of drying agent. *Machinery and Energetics*, 16(3), 33–47. <https://doi.org/10.31548/machinery/3.2025.33>.
- [17] Liu, S., Li, H., Kruber, B., Skiborowski, V., Gao, X. (2022). Process intensification by integration of distillation and vapor permeation or pervaporation: An academic and industrial perspective. *Results in Engineering*, 15, 100527. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100527>.
- [18] Li, J., Wang, T. (2025). Environment-oriented assessment of hybrid methods for separation of N-propanol–water mixtures: Combination of distillation and hydrophilic pervaporation processes. *Membranes*, 15(2), 48. <https://doi.org/10.3390/membranes15020048>.
- [19] Kabawa, B., Sampers, I., Raes, K. (2026). Unveiling synergy in ultrasound-assisted enzymatic extraction: Role of treatment sequence and biomass complexity. *UAE – Ultrasonic Assisted Enzymatic Extraction – гібридизація ультразвукового впливу з ферментативною обробкою – сучасний метод інтенсифікації технологічних процесів, при якому ультразвук використовується для підсилення дії ферментів.*

- Ultrasonics Sonochemistry*, 125, 107749. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2026.107749>.
- [20] Liu, Y., Zhe, W., Zhang, R., Peng, Z., Wang, Y., Gao, H., Guo, Z., Xiao, J. (2022). Ultrasonic-assisted extraction of polyphenolic compounds from *Paederia scandens* (Lour.) Merr. Using deep eutectic solvent: Optimization, identification, and comparison with traditional methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86, 106005. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106005>.
- [21] Kuzyk, O. O., Atamanyuk, V. M., Gumnitsky, Y. M., Ivashchuk, O. S. (2025). Mass transfer during the dissolution of sodium tetraborate in water intensified by mechanical stirring. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(3), 901–910. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i3.331092>.
- [22] Kuzyk, O., Atamaniuk, V., Gumnitsky, Y. (2024). Mass transfer during boric acid dissolution. *Chemistry Chemical Technology*, 18(3), 393–400. <https://doi.org/10.23939/chcht18.03.393>.
- [23] Pavlenko, A. (2025). Analysis of methods for intensifying heat and mass transfer in liquid media. *Energies*, 18(6), 1419. <https://doi.org/10.3390/en18061419>.
- [24] Založnik, M., Zadavec, M. (2025). Analysis of gas flow distribution in a fluidized bed using two-fluid model with kinetic theory of granular flow and coupled CFD-DEM: A numerical study. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 71(9–10), 349–356. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2025.1365>.
- [25] Szpicer, A., Bińkowska, W., Stelmasiak, A., Zalewska, M., Wojtasik-Kalinowska, I., Piwowarski, K., Piepiórka-Stepuk, J., Pótorak, P. (2025). Computational fluid dynamics simulation of thermal processes in food technology and their applications in the food industry. *Applied Sciences*, 15(1), 424. <https://doi.org/10.3390/app15010424>.
- [26] Kornienko, Y., Haidai, S., Sameliuk, O. (2023). Increasing the efficiency of transfer processes when using inhomogeneous fluidization. *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” Series “Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, 22(1), 9–19. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2023.276443>.
- [27] Elwakeel, A. E., Ali, G., Eldin, A. Z., Alsebiey, M. M., Tantawy, A.A., Al-Harbi, M.S., Ahmed, A.F., Metwally, K.A. (2025). Influence of physical shape and salting on tomato drying performance using mixed mode solar and open-air methods in semi-cloudy weather. *Scientific Reports*, 15, 26340. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11194-5>.
- [28] Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., Ren, X. (2023). A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 101, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>.
- [29] Yu, P., Zhu, W., Shen, C., Qiao, Y., Zhang, W., Zhu, Y., Gong, J., Cai, J. (2025). Current status of grain drying technology and equipment development: A review. *Foods*, 14(14), 2426. <https://doi.org/10.3390/foods14142426>.
- [30] Grillo, J., Cintas, P., Colia, M., Gaudino, E. C., Gravotto, G. (2022). Process intensification in continuous flow organic synthesis with enabling technologies. *Frontiers in Chemical Engineering*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fceng.2022.966451>.
- [31] Khan, M. N., Boorsma, E., Vandezande, P., Lammerink, I., de Lange, R., Buekenhoudt, A., Van Dael, V. (2025). Unlocking the benefits of hybrid and standalone pervaporation for IPA dehydration. *Membranes*, 15(8), 224. <https://doi.org/10.3390/membranes15080224>.
- [32] Do Thi, H. T., Tóth, A. J. (2024). Environmental evaluation and comparison of hybrid separation methods based on distillation and pervaporation for dehydration of binary alcohol mixtures with life cycle, PESTLE, and multi-criteria decision analyses. *Separation and Purification Technology*, 348, 127684. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127684>.