

УДК 664.38:66.063.6:66.084:633.522

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.139>

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ СТАБІЛЬНОЇ ХАРЧОВОЇ МАТРИЦІ КОНОПЛЯНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ЗА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

Ірина Миколаївна Берник*доктор технічних наук, професор*<https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>,*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
03041, Героїв Оборони, м. Київ, Україна***Ігор Олегович Драчук***аспірант*<https://orcid.org/0000-0003-0018-2871>*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
03041, Героїв Оборони, м. Київ, Україна*

Анотація. Стабілізація нанодисперсних систем у рослинних емульсіях без додавання сторонніх агентів є складним фізико-хімічним завданням. Розуміння морфологічної трансформації компонентів конопляного ядра під впливом акустичних полів є ключем до створення термодинамічно стабільних харчових систем. У сучасній харчовій інженерії технологічні дисперсні середовища розглядаються як ієрархічно організовані системи, де стабільність має забезпечуватися за рахунок специфічних функцій власних компонентів сировини. Для конопляних емульсій критичним є розуміння потенціалу диспергування жирової фази та активації стабілізуючих властивостей білка едестину. Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробці фізичної моделі морфологічної трансформації компонентів конопляної емульсії під дією акустичної кавітації для забезпечення її довготривалої кінетичної стійкості за рахунок використання внутрішніх ресурсів сировини. Розроблено фізичну модель, що описує динаміку руйнування жирових глобул під дією локальних градієнтів тиску та мікропотоків, що виникають при колапсі кавітаційних бульбашок. Описано морфологічний перехід системи від грубодисперсного до нанодисперсного стану. Процес супроводжується інтенсивним подрібненням жирових глобул та денатураційною активацією едестину, що призводить до розгортання його компактної глобулярної структури в амфифільну форму. Навколо жирових крапель формується щільна в'язко-пружна білкова оболонка за рахунок адсорбції та утворення міжмолекулярних дисульфідних містків, що перешкоджає їх злиттю. Визначено умови кінетичної стійкості системи через формування структурованого адсорбційного шару білка едестину, який забезпечує стеричний та електростатичний бар'єр проти коалесценції. Вперше запропоновано фізичне обґрунтування стабілізації рослинних емульсій як результат морфологічної перебудови нанофаз під дією кавітації. Обґрунтовано умови агрегативної та кінетичної стійкості, що базуються на досягненні критичного термодинамічного порогу $V_{max} \geq 20k_B T$ та домінуванні енергії теплового броунівського руху над гравітаційними силами ($k_B T \geq E_g$). Розроблена модель підтверджує, що створення стабільних функціональних напоїв з конопель вимагає застосування сучасних фізичних методів обробки, зокрема ультразвукових кавітаційних технологій, для управління наноструктурними процесами та реалізації концепції «чиста етикетка».

Ключові слова: конопляна емульсія, едестин, ультразвукова кавітація, фізична модель, морфологічна трансформація, кінетична стійкість, нанодисперсна фаза.

UDC 664.38:66.063.6:66.084:633.522

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2026.139>

PHYSICAL MODEL OF STABLE FOOD MATRIX FORMATION IN HEMP EMULSION UNDER ULTRASONIC CAVITATION

Iryna Bernyk

Doctor of Technical Sciences, Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>,

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
03041, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine*

Igor Drachyk

Postgraduate Student,

<https://orcid.org/0000-0003-0018-2871>

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
03041, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, Ukraine*

Abstract. Stabilizing nanodispersed systems in plant-based emulsions without the addition of external agents remains a complex physico-chemical challenge. Understanding the morphological transformation of hemp kernel components under the influence of acoustic fields is fundamental to creating thermodynamically stable food systems.

In modern food engineering, technological dispersed media are viewed as hierarchically organized systems in which stability is achieved through the specific functional properties of the raw material's endogenous components. For hemp emulsions, it is critical to determine the lipid phase's dispersion potential and the activation of the edestin protein's stabilizing properties.

The objective of this study is to develop and theoretically substantiate a physical model of the morphological transformation of hemp emulsion components under acoustic cavitation to ensure long-term kinetic stability by utilizing internal raw material resources.

A physical model has been formulated to describe the dynamics of lipid globule disruption under local pressure gradients and micro-jets generated by the collapse of cavitation bubbles. The morphological transition of the system from a coarse-dispersed to a nanodispersed state is described. This process is accompanied by intensive fragmentation of lipid globules and the denaturation activation of edestin, resulting in the unfolding of its compact globular structure into an amphiphilic form. A dense viscoelastic protein shell forms around lipid droplets through adsorption and the formation of intermolecular disulfide bridges, effectively preventing coalescence. The conditions for kinetic stability are defined by the formation of a structured adsorption layer of edestin, which provides both a steric and an electrostatic barrier against coalescence.

For the first time, a physical substantiation is proposed for the stabilization of plant-based emulsions as a result of nanophase morphological restructuring under cavitation. The conditions for aggregative and kinetic stability are substantiated by reaching a critical thermodynamic threshold and by the dominance of thermal Brownian motion energy over gravitational forces.

The developed model confirms that producing stable, functional hemp-based beverages requires the application of advanced physical processing methods, specifically ultrasonic cavitation technologies, to control nanoscale processes and realize the Clean Label concept.

Keywords: hemp emulsion, edes tin, ultrasonic cavitation, physical model, morphological transformation, kinetic stability, nanodispersed phase.

ВСТУП. Сучасні глобальні тренди харчової індустрії демонструють стійке зміщення споживчого попиту в бік харчових продуктів із максимально натуральним складом. Концепція здорового харчування сьогодні нерозривно пов'язана з принципами «чистої етики» (clean labels). У цьому контексті виробництво рослинних аналогів молока є одним із найбільш динамічних сегментів ринку, що відповідає глобальним запитам на екологічність та функціональність продуктів (Bernyk, I., et al., 2025). Проте задоволення потреб споживачів у високій якості та стабільності продукції вимагає розробки інноваційних підходів, що дозволяють створювати стійкі системи виключно шляхом використання внутрішніх технологічних ресурсів сировини. Найбільш перспективним інструментом для вирішення цього завдання є ультразвукова кавітаційна обробка. Вона здатна трансформувати морфологію нативних компонентів на нанорівні, забезпечуючи самостабілізацію системи через денатураційну активацію білків та формування адсорбційних захисних оболонок навколо ліпідних нанокрапель.

Рослинні продукти визначили пріоритетний вектор розвитку сучасної харчової індустрії, яка прагне створювати більш сталі, екологічно чисті та здорові харчові продукти. Зростання інтересу до здорового харчування та рослинних дієт стимулювало трансформацію галузі, де розробка рослинних емульсій стала центральним вектором інновацій. Сучасні споживачі вимагають не лише функціональних аналогів молочних продуктів, а й дотримання принципів «чистої етикетки» (Clean Label), що передбачає відмову від синтетичних добавок на користь натуральних інгредієнтів та мінімально обробленої сировини. Стабілізація таких систем є складним інженерним завданням, оскільки рослинні білки та ліпіди мають відмінну молекулярну будову та функціональність у порівнянні з тваринними аналогами (Huang Y. et al, 2025; Kaczmarek D. et al, 2025; Sarkar A. et al, 2020).

Традиційний підхід досягнення стабілізації рослинних напоїв базується на використанні екзогенних гідроколоїдів, які додають до системи для запобігання седиментації нерозчинних часток та коалесценції жирових крапель (Yang H. et al, 2026). Вони у рослинних напоях формують міцну структурну матрицю, ефективним є взаємодія з білками через електростатичні сили (Mata, S. et al, 2025).

Поряд з технологічною ефективністю, використання екзогенних гідроколоїдів має низку проблем, що обмежують їх застосування в сучасних рецептурах. Одним із основних недоліків є негативний вплив на органолептичні характеристики харчових продуктів (Yang H. et al, 2026). Крім того, встановлено складність прогнозування реальної поведінки таких систем у складних матрицях. Проте, найбільш критичним фактором застосування деяких емульгаторів є їх вплив на здоров'я людей (Chassaing, B., et al, 2022; Naimi, S., et al, 2021).

Концепція «чиста етикетка» еволюціонувала з маркетингового ходу в фундаментальний стандарт якості. Фактично споживач асоціює натуральність з такими особливостями, як короткий список інгредієнтів, відсутність харчових добавок та пізнаваністю складових інгредієнтів (Liu, Y. et al, 2026; Cao Y. et al, 2023, Maruyama S. et al, 2021).

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ. Мета роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробці фізичної моделі морфологічної трансформації компонентів конопляної емульсії під дією акустичної кавітації для забезпечення її кінетичної стійкості за рахунок використання внутрішніх ресурсів сировини.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Головним викликом для фахівців харчової галузі є досягнення технологічної стабільності без використання традиційних стабілізаторів, що особливо актуально для рослинних напоїв. Використання внутрішніх ресурсів сировини є відповіддю на сучасні

виклики, та полягає у максимальній активації функціональних властивостей білків, ліпідів та волокон, що природно містяться в рослинах (Jin, Y. et al, 2025).

Дослідженнями Lopez C. et al. (2024) встановлено, що рослинні білкові ізоляти часто містять значну частку ендогенних ліпідів (до 12% у горохових ізолятах), які раніше вважалися домішками. Механізм стабілізації за участю ендогенних ліпідів базується на їх перерозподілі під час емульгування, що дозволяє створювати стабільні системи без додавання зовнішнього лецитину.

Оскільки хімічна модифікація білків заборонена концепцією «чистої етикетки», інженери звернулися до біотехнологічних методів. Використання специфічних ферментів дозволяє змінити структуру білка, не залишаючи сторонніх речовин у готовому продукті (Lopez C. et al., 2024, McClements D.J, et al., 2021; Kovačević, J., et al., 2024).

Одним із напрямків концепції «чистої етикетки» в інженерії є створення емульсій Пікерінга, де замість розчинних молекул емульгаторів використовуються тверді колоїдні частинки, наприклад, нановолокна целюлози, мікрочастинки нерозчинного крохмалю, білкові наногелі або їх агрегати (Somayeh Taghian Dinani et al., 2023; Amine C. et al., 2014). Механізм дії полягає в незворотній адсорбції частинок на межі поділу фаз, що створює потужний стеричний бар'єр проти коалесценції (Tian Y. et al., 2023, Kirti Rawal et al., 2025).

Для досягнення високої стабільності рослинних емульсій часто недостатньо простого змішування. Використовуються високоенергетичні методи, які змінюють структуру біополімерів та розмір частинок.

Гомогенізація високого тиску є технологією для створення стабільних наноемульсій, що базується на дії сил зсуву, турбулентності та кавітації, що виникають при проходженні рідини через вузький клапан під тиском до 300–400 МПа (Mesa J, et al., 2020). Високий тиск призводить до часткової денатурації білків, як наслідок, підвищення їх поверхневої гідрофобності та покращена адсорбція.

Одним із найбільш перспективних напрямів у цій сфері є застосування високоінтенсивного ультразвуку, робота якого базується на явищі акустичної кавітації. Вивчення теоретичних засад впливу ультразвукових хвиль на рідкі харчові системи, аналіз фізичних ефектів кавітації та дослідження конформаційних змін макромолекул є критично важливими для розуміння потенціалу цієї технології. Вплив ультразвуку на рідкі середовища є складним багатофакторним процесом, що поєднує в собі механічні, термічні та хімічні аспекти (Mondal J, et al., 2021; Bernyk, I. M. et al., 2013; Nazarenko, I., et al., 2021; et al., Luhovskyi, O., 2021).

Розуміння цих аспектів дозволяє диференціювати вплив ультразвуку залежно від частоти та потужності. Низькочастотний ультразвук (20–100 кГц) частіше асоціюється з потужними механічними ефектами та теорії гарячих точок, тоді як високочастотні системи (понад 300 кГц) сприяють сонохімічним процесам (Bermudez-Aguirre, D., et al., 2022; Bernyk, I., et al., 2025).

Ці дані свідчать про те, що акустична кавітація є потужним, але водночас гнучким інструментом. Змінюючи параметри обробки (амплітуду, час, температуру), можна досягти як легкого розгортання білка для покращення його розчинності, так і глибокої модифікації для створення нових текстур (Zhu X, et al., 2024; Heloisa de Fátima Mendes Justino, et al., 2024; Yuanqing, H., et al., 2020).

Фізична модель системи сприятиме розумінню взаємодії кавітаційного поля з дисперсною системою. Модель обґрунтовує особливості утворення, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок, а також фізико-хімічних ефектів та результатів їх дії, які безпосередньо відповідають за подрібнення жирової фази. Важлива оцінка кавітаційного впливу на морфологічні зміни дисперсної фази емульсії, зокрема білкових речовин. Кінетична стійкість системи формується за використання власних ресурсів шляхом створення захисного адсорбційного шару на поверхні

подрібнених жирових крапель за участю молекул едестину. Інструментальні вимірювання ключових характеристик отриманої емульсії виступають кількісними індикаторами ефективності запропонованих техніко-технологічних рішень.

Застосування акустичної кавітації відповідає принципам "зеленої технології". Використання ультразвуку зменшує температурні навантаження на продукт, зберігаючи вітаміни та біоактивні пептиди (Antunez-Medina, J. R., et al., 2025; Luhovskyi, O. F., et al., 2010). Кавітація, руйнуючи клітинні мембрани мікроорганізмів та інактивуєчи небажані ферменти, подовжує термін придатності продуктів (Bernyk, I. M. et al., 2019; Luhovskyi, O. F., et al., 2022).

Таким чином, сучасний вектор розвитку харчової індустрії поєднує сталість, функціональність та принципи концепції «чиста етикетка». Глибоке розуміння міжфазних взаємодій у поєднанні з впровадженням «м'яких» методів обробки є ключовим для збереження цінності рослинних ресурсів. Зокрема, використання ультразвукової кавітації відкриває шлях до створення продуктів нового покоління, що відповідають високим стандартам якості та екологічної відповідальності.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Методологія дослідження базується на системному підході, згідно з яким конопляна емульсія розглядалася як ієрархічно організована система, де стабільність забезпечується специфічними функціями її власних нативних компонентів. У роботі застосовано методи фізичного та математичного моделювання динаміки системи «ультразвуковий кавітатор - емульсія». Об'єктами моделювання були морфологічні структури насіння конопель (ліпідні тіла та глобули едестину) та стабільна нанодисперсна фаза. Оцінку кінетичної та агрегативної стійкості системи здійснено за використання закону Стокса та розширеної теорії ДЛФО для розрахунку балансу сил електростатичного та стеричного відштовхування, і молекулярного притягання Ван-дер-Ваальса.

Об'єктом дослідження є процеси морфологічної трансформації та структурної модифікації компонентів конопляної емульсії під дією ультразвукової кавітації для формування її довготривалої кінетичної стійкості.

Предметом дослідження є фізико-хімічні закономірності взаємодії в системі «ультразвукове поле - конопляна емульсія», що включають наноструктурне подрібнення жирової фази, активацію білка едестину та формування електростеричних захисних бар'єрів на межі поділу фаз.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. Для побудови узагальненої фізичної моделі морфологічної трансформації та кінетичної стабілізації нанодисперсних фаз конопляної емульсії в умовах ультразвукового кавітаційного впливу доцільно розглянути послідовність етапів їх перетворення (рис. 1).

Представлена модель відображає системний підхід, де кожен з етапів є надзвичайно важливим для формування стабільної системи. Вона демонструє перехід від аналізу вихідних морфологічних чинників ядра насіння конопель до синтезу наносистеми з прогнозованими властивостями через цілеспрямований акустомеханічний вплив. Такий підхід забезпечує досягнення необхідного балансу сил міжмолекулярної взаємодії, що є необхідною умовою для забезпечення агрегативної та кінетичної стійкості продукту.

Відповідно до запропонованої блок-схеми детально розглянемо етапи формування стабільної харчової матриці конопляної емульсії в умовах інтенсивного акустомеханічного впливу.

Етап I. Дослідження початкового стану емульсійної системи. У нативному стані ключові

макронутрієнти насіння конопель представлені просторово ізольованими структурами. Основна частина ліпідів зосереджена в сім'ядолях у формі олеосом, оточених фосфоліпідною мембраною з білками-олеозинами. Білкові речовини, представлені переважно едестином, які локалізовані у протеїнових тілах. Клітинні стінки, що складаються з целюлози, геміцелюлози та пектину, забезпечують структурну цілісність макроелементів у їхньому нативному стані.



Рисунок 1. Блок-схема узагальненої фізичної моделі конопляної емульсії

Джерело: розроблено авторами

За технологічного впливу, спрямованого на підготовку компонентів до виробництва рослинного напою, відбуваються суттєві зміни природного стану сировини. Зокрема, внаслідок механічного подрібнення та диспергування у водному середовищі система переходить у стан грубої дисперсії. Дисперсна фаза такої гетерогенної системи представлена краплями конопляної олії, розмір яких перевищує 10 мкм, що за умов дії гравітаційних сил зумовлює швидке розшарування.

Водночас у водному дисперсійному середовищі перебувають і решта екстрагованих речовин, зокрема нативні глобули едестину. Едестин відносять до високомолекулярного білка, що має олігомерну будову та складається з шести субодиниць. Кожен гексамер має молекулярну масу близько 50 кДа та утворений кислим і основним поліпептидними ланцюгами, які сполучені між собою дисульфідним (–S–S–) зв'язком. У такому стані едестин має компактну конфігурацію.

За своєю просторовою архітектурою макромолекула едестину наближена до сплюсненого сфероїда. Специфіка її будови полягає у чіткій диференціації на внутрішню область з локалізованими неполярними амінокислотними радикалами та зовнішній шар з полярними групами, які забезпечують взаємодію з водним середовищем. У нативному стані білка його гідрофобні складові розміщені всередині глобули. Така ізоляція обмежує можливість контакту гідрофобних ділянок із жировою фазою, що зумовлює низьку початкову емульгуючу здатність едестину без додаткової активації.

Загалом, така дисперсна система є термодинамічно нестійкою. Це пов'язано з високим рівнем надлишкової вільної енергії Гіббса на межі поділу фаз «олія - вода». Прагнення системи до мінімізації цього енергетичного потенціалу без зовнішнього стабілізуючого впливу призводить до агрегації частинок та фазового розділення емульсії.

Стан системи можна описати рівнянням:

$$\Delta G = \sigma \cdot \Delta A, \tag{1}$$

де ΔG – надлишкова вільна енергія системи; σ – поверхневий натяг на межі поділу фаз; ΔA – загальна площа поверхні розділення фаз.

Значний поверхневий натяг та велика питома площа поверхні жирових крапель створює умови нестабільності емульсії. Система прагне до мінімізації вільної енергії Гіббса шляхом злиття крапель, як наслідок відбувається її розшарування.

Етап II. Динамічна система «ультразвук - емульсія». Застосування ультразвукової обробки забезпечує перетворення акустичної енергії у механічну роботу, яка направлена на технологічне середовище. Високоенергетичний вплив та дія фізичних факторів, що виникають безпосередньо в об'ємі суміші, сприяють забезпеченню технологічного впливу, який переходить із макрорівня на мікро- та нанорівні. Ключовим фактором цього процесу є акустична кавітація. Під час сплескування кавітаційних бульбашок вивільняється енергія, що супроводжується виникненням локальних ударних хвиль та кумулятивних мікроструменів зі швидкістю 100-400 м/с, що зумовлює потужні імпульсні навантаження на компоненти дисперсного середовища. Також, на ефективність обробки суттєво впливають гідродинамічні напруження зсуву та ряд супутніх фізико-хімічних явищ. Поряд із механічною дією проявляється термомеханічний ефект, спричинений появою ділянок із критично високою температурою в місцях сплескування кавітаційних бульбашок. Такі локальні температурні стрибки забезпечують трансформацію нативної глобулярної структури білка. У результаті гідрофобні ділянки едестину стають доступними для активної взаємодії з ліпідною фазою.

Етап 3. Морфологічні зміни дисперсної фази. Вплив зовнішнього акустичного поля забезпечує диспергування жирових кульок емульсії. Ультразвукова обробка формує зони високої турбулентності та значні градієнти швидкості, енергія яких суттєво переважає сили поверхневого натягу ліпідної фази. Унаслідок цього жирові краплі деформуються та руйнуються, як наслідок, зменшення їх розміру. Кінцевий ступінь подрібнення жирової фази має пряму залежність від обраних технологічних параметрів ультразвукового впливу.

Одночасно з трансформацією жирових кульок відбувається також вплив на білкову фракцію системи. Під дією інтенсивних гідродинамічних навантажень та локального термічного фактора нативний білок едестин зазнає денатураційної активації. Гідродинамічні ефекти кавітації спричиняють розрив слабких нековалентних зв'язків, наприклад, водневих, іонних та гідрофобних взаємодій. Це змінює конформацію білкової молекули. Як наслідок, великий білковий комплекс розпадається на менші олігомери та окремі мономерні. Фактично відбувається перетворення структури з компактної глобулярної на розгорнуту.

Таким чином, відбувається два паралельних процеси трансформації компонентів дисперсної фази технологічного середовища. Розгортання білкової молекули є необхідною умовою формування емульгуючої його здатності, за рахунок доступу до внутрішніх гідрофобних ділянок, які у нативному стані сконцентровані у ядрі глобули. Розгорнуті ланцюги білка є необхідними елементами, які взаємодіють із новоствореною поверхнею жирових нанокрапель.

Етап 3. Стабілізація жирових кульок модифікованими молекулами едестину.

Цей етап характеризується перебігом трьох умовно послідовних процесів: зниженням міжфазного натягу, формуванням структурно-механічного бар'єру та наступною електростеричною стабілізацією.

Оскільки система «олія-вода» вирізняється високою вільною енергією на межі поділу фаз, вона термодинамічно прагне до її мінімізації шляхом скорочення площі міжфазного контакту. В той же час, зростання коефіцієнта дифузії білка, зумовлене зниженням його молекулярної маси забезпечує інтенсивну адсорбцію гідрофобних молекул на поверхні жирових крапель.

Для розгорнутої молекули едестину характерно збільшення активності вільних сульфгідрильних груп (–SH), які вступають у реакції окиснення з сусідніми молекулами. Це призводить до утворення міжмолекулярних дисульфідних містків (–S–S–), унаслідок чого навколо жирових крапель формується суцільна в'язко-пружна білкова оболонка, що забезпечує структурну стабільність системи.

Таким чином, за технологічного впливу ультразвукової кавітаційної обробки відбувається модифікація макромолекул едестину, що призводить до формування щільної оболонки навколо жирових крапель, яка перешкоджає їх злиттю. Такі наночастинки характеризуються підвищеною середньою щільністю, що, як наслідок, сповільнює розшарування емульсії. Заряджені групи едестину на поверхні жирових кульок створюють однойменний заряд, що формує умови відштовхування крапель одна від одної.

Етап 4. Обґрунтування критеріїв кінетичної стійкості нанодисперсної системи конопляної емульсії в умовах кавітаційного впливу.

Стабільність системи базується на синергії двох факторів: мінімізації швидкості розшарування (кінетичний аспект) та створенні енергетичного бар'єру (енергетичний аспект).

Кінетична стійкість системи визначається швидкістю гравітаційного розшарування, яка описується законом Стокса:

$$v = \frac{2R^2 g (\rho_p - \rho_{ж})}{9\eta}, \quad (2)$$

де R – радіус частинки; g – прискорення вільного падіння; $\rho_p, \rho_{ж}$ – густина фаз; η – динамічна в'язкість.

Ультразвукова кавітація забезпечує ефективне диспергування жирової фази, що призводить до квадратичного зниження швидкості гравітаційного розшарування.

За умови досягнення нанорозміру часток, головною проблемою для стабільності системи постає агрегація жирових кульок. За використання розширеної теорії ДЛФО енергетичний стан системи описується балансом сил:

$$V_{total} = (V_R + V_S) - |V_A|, \quad (3)$$

де V_{total} – сумарна потенційна енергія взаємодії; V_R – енергія електростатичного відштовхування; V_S – енергія просторового відштовхування; V_A – енергія молекулярного притягання.

Розглянемо енергії представлені в залежності 3, та оцінімо їх вплив на енергетичний стан системи.

Енергія молекулярного притягання для двох сферичних частинок однакового радіуса, що знаходяться на близькій відстані одна від одної за теорією Гамакера описується рівнянням:

$$V_A = -\frac{AR}{12H}, \quad (4)$$

де A – стала Гамакера, Дж; R – радіус жирової краплі, м; H – відстань між поверхнями крапель. Знак «-» вказує на спрямування енергії на притягування.

Енергія зумовлена дисперсійними силами Ван-дер-Ваальса, що виникають за хаотичного руху молекул та утворення диполів, які індукують появу аналогічних диполів у сусідній краплі, що призводить до виникнення сили взаємного притягання. Величина рівня енергії стрімко зростає за умови наближення крапель одна до одної за гіперболічною залежністю. За умови перевищення значення енергії електростатичного відштовхування краплі зливаються. За використання

ультразвукової кавітаційної обробки розмір жирових кульок суттєво зменшується. Оскільки V_A прямо пропорційна радіусу, енергія притягання між частинками суттєво зменшується порівняно з грубодисперсною емульсією. При цьому, за умови зниження величини енергії притягання між частинками, їхня кількість в одиниці об'єму зростає експоненціально. Як наслідок, середня відстань між ними скорочується, що потребує термінового створення захисних оболонок з едестину для компенсації сил Ван-дер-Ваальса.

Енергію електростатичної взаємодії V_R опишемо через потенціал поверхні:

$$V_R = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R\zeta^2 \ln(1 + \exp(-kH)), \quad (5)$$

де ϵ, ϵ_0 - діелектрична проникність середовища та вакууму; ζ - електрокінетичний потенціал поверхні краплі (В); $1/k$ - товщина подвійного електричного шару; R - радіус частинки; H - відстань між частинками.

Енергія електростатичної взаємодії виникає шляхом адсорбування білків на межі поділу фаз та формування навколо жирових крапель оболонок із поверхневим зарядом. Це суттєво підвищує за модулем електрокінетичний потенціал поверхні краплі системи. Оскільки всі краплі в емульсії мають однойменний заряд, при їх зближенні відбувається відштовхування, що не дозволяє краплям підійти на відстань, де почнуть домінувати сили притягання Ван-дер-Ваальса.

Енергію просторового відштовхування за моделлю Маккора можна представити як функцію від товщини адсорбційного шару:

$$V_S = \frac{100Rk_B T C^{3/2}}{L} \exp\left(-\frac{\pi H}{L}\right), \quad (6)$$

де L - товщина білкового захисного шару на поверхні краплі (м); C - ступінь покриття поверхні білком; k_B - стала Больцмана (Дж/К); T - абсолютна температура (К).

Стеричне відштовхування виникає у зв'язку з формуванням навколо жирових крапель шару з адсорбованих макромолекул білка. Коли жирові краплі наближаються одна до одної на відстань, меншу за подвійну товщину білкового шару, їхні адсорбційні оболонки починають перекриватися. У зоні контакту різко зростає локальна концентрація сегментів білкових ланцюгів, як наслідок, виникають умови за яких система прагне вирівняти концентрацію за використання надходження молекул води. Виникає осмотичний тиск, який відділяє краплі одна від одної.

Відповідно до вищезначеного умова стабільності базується на співвідношенні сил у системі, описується взаємопов'язаними нерівностями агрегативної та кінетичної стійкості.

Умову агрегативної стійкості представимо у вигляді залежності:

$$V_{max} = (V_R + V_S) - |V_A| \geq 20k_B T, \quad (7)$$

Агрегативної стійкості система досягає за умови досягнення критичного термодинамічного порогу, визначеного розширеною теорією ДЛФО (McClements D. J., et al, 2015). Тобто сума електростатичного відштовхування та стеричного опору білкової оболонки едестину має бути в 20 разів вищою за енергію теплового зіткнення часток, що гарантує цілісність оболонок за можливих випадкових ударів частинок одна об одну.

Умову кінетичної стійкості представимо у вигляді залежності:

$$k_B T \gg E_g, \quad (8)$$

Кінетична стійкість конопляної емульсії ґрунтується на стані седиментаційної рівноваги, за якого енергія теплового броунівського руху значно перевищує гравітаційне осадження за законом Стокса та гарантує однорідність рослинного аналога молока протягом усього терміну зберігання.

Результатом такого комплексного підходу є узагальнена структурно-логічна схема стабілізації колоїдної системи напою з насіння конопель, яка наочно відображає ієрархію переходів від первинних параметрів обробки до формування кінетично стійкої наносистеми з заданими властивостями (рис. 2).

Встановлення взаємозв'язку між вхідними технологічними чинниками та механізмами мікроструктурних змін дає змогу не лише контролювати процес кавітації, а й прогнозувати властивості готового рослинного напою.

Критичний аналіз сучасного стану технологій виробництва рослинних аналогів молока свідчить про те, що традиційні методи обробки не дозволяють повною мірою реалізувати внутрішній стабілізуючий потенціал сировини (Вернук, et al, 2025). Встановлено, що за звичайної обробки ключові макронутрієнти рослинної сировини, зокрема і, конопляного ядра залишаються просторово ізольованими. Це призводить до формування термодинамічно нестабільної грубодисперсної системи, яка схильна до швидкого гравітаційного розшарування.

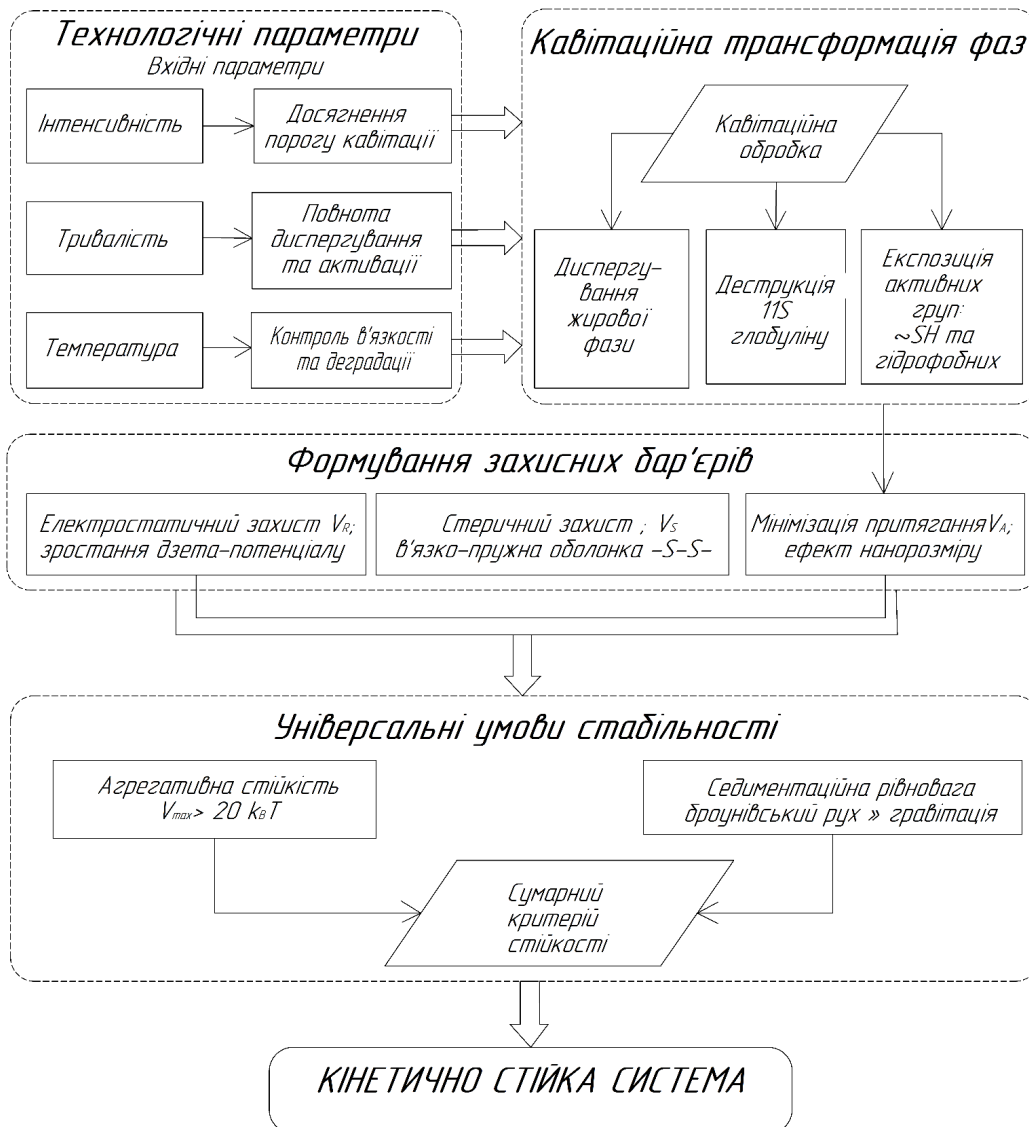


Рисунок 2. Узагальнена структурно-логічна схема стабілізації колоїдної системи напою з насіння конопель

Джерело: розроблено авторами

Сучасний розвиток харчової індустрії диктує перехід до концепції «чистої етикетки». Проте створення стабільних рослинних емульсій без екзогенних гідроколоїдів є складним інженерним завданням через суттєві відмінності у структурі рослинних та тваринних білків.

Перспективи подальшого розвитку галузі лежать у площині персоналізованого дизайну харчових матриць, де кожен компонент сировини виконує кілька технологічних ролей, забезпечуючи синергію, стабільність та високу біологічну цінність. Харчові емульсії не можна розглядати як прості бінарні суміші. Це складні гетерогенні матеріали, чії властивості (смак, текстура, стабільність) є результатом взаємодій на нано-, мікро- та макроструктурному просторових рівнях (Kim T.I., et al., 2025; Mahajan P, et al., 2023; Tian Y, et al., 2023; Jie, Y., et al., 2022; Yiu, C. C.-Y., et al., 2023). У сучасній харчовій інженерії така ієрархічність використовується для точного конструювання властивостей харчового продукту (Kaczmarek D, et al., 2025; Günan, K. T., et al., 2025).

Результати нашого дослідження демонструють, що розв'язання цієї проблеми лежить у площині цілеспрямованого управління морфологією нативних компонентів сировини через високоенергетичний акустичний вплив.

Отримані результати свідчать про те, що процес стабілізації конопляної емульсії під дією ультразвуку не є звичайним подрібненням, а являє собою керовану морфологічну перебудову фаз. Ключова відмінність запропонованої моделі від традиційних методів гомогенізації полягає у синергії механічного руйнування та біохімічної активації внутрішніх ресурсів сировини.

Ефективність акустичної кавітації як інструменту структурної модифікації визначається здатністю концентрувати значну енергію в обмеженому просторі. Колапс кавітаційних бульбашок породжує три основні фізичні явища, що безпосередньо впливають на структуру біополімерів: ударні хвилі, мікрострумені та локальні термічні ефекти (Luhovskyi, O. F., et al., 2022).

Якщо кавітаційна бульбашка колапсує поблизу твердої поверхні процес стає асиметричним. У білкових розчинах мікрострумені сприяють розкручуванню поліпептидних ланцюгів та експозиції внутрішніх функціональних груп (Pandit A.V, et al., 2021; Antunez-Medina, J. R., et al., 2025).

Хоча загальна температура в ультразвуковому реакторі може залишатися помірною, у мікрооб'ємі колапсу бульбашки виникають короткочасні теплові стрибки. Термічна енергія та гідроксильні радикали сприяє подоланню активаційного бар'єру для переходу білка з нативної конформації у денатуровану (Antunez-Medina, J. R., et al., 2025). Ці ефекти діють синергічно. Наприклад, ударні хвилі спочатку послаблюють структуру білкового агрегату, а мікрострумені та радикали завершують процес, переводячи білок у більш розчинний та функціонально активний стан (Yuanqing, H., et al., 2020; Héloïsa de Fátima Mendes Justino, et al., 2024).

Особливого значення набуває вплив кавітації на білок едестин - основний компонент конопляного насіння. У науковій літературі білок едестин традиційно характеризується як олігомерний 11S глобулін із компактною гексамерною структурою. Більшість існуючих досліджень розглядають білок едестин як пасивний компонент із низькою емульгувальною здатністю через його компактну глобулярну конфігурацію. У нативному стані гідрофобне ядро едестину ізольоване гідрофільною оболонкою, що унеможливує його ефективну адсорбцію на межі поділу фаз (Tang, C. H., et al., 2006; Malomo, S. A., et al., 2006; Wang, X. S., et al., 2008).

Відповідно до досліджень Kaczmarek, D. et al. (2025) рослинні білки мають природну

амфіфільну структуру. Проте, на відміну від еластичних молочних білків, рослинні створюють навколо крапель жиру більш жорстку оболонку. Для підвищення стабільності в рамках концепції «чистої етикетки» використовується метод комбінування білків з різних джерел. Наприклад, суміш білків гороху та сироватки або різних рослинних білків може виявляти синергію, формуючи міжфазні шари та запобігати кремуванню жирових крапель (Lopez C. et al., 2024).

Проте, високоенергетичний вплив ультразвукового поля в кавітаційному режимі, зокрема локальні температурні стрибки та високошвидкісні мікрострумені дозволяє подолати енергетичний бар'єр денатурації. Це призводить до розгортання молекули та експозиції внутрішніх гідрофобних ділянок. Важливим аспектом обговорення є те, що демаскування вільних сульфідних (-SH) груп ініціює реакції окиснення між сусідніми молекулами, що веде до утворення міжмолекулярних дисульфідних містків. Саме -S-S- зшивання забезпечує формування в'язко-пружної оболонки, яка фізично перешкоджає коалесценції крапель.

Аналіз енергетичного стану системи згідно з розширеною теорією ДЛФО (McClements, D. J., et al 2015; Damodaran, S., et al 2017) показує, що сформовані білкові шари забезпечують поєднання двох типів захисту електростатичне відштовхування за рахунок високого електрокінетичного потенціалу однойменно заряджених груп білка на поверхні крапель та стеричний бар'єр за виникнення осмотичного тиску при перекритті білкових оболонок.

Обґрунтування агрегативної стійкості наносистеми базується на балансі сил відштовхування та притягання. Встановлено, що формування білкових оболонок призводить до різкого зростання електрокінетичного потенціалу. За умови адсорбції активованого едестину сумарна енергія електростатичного та стеричного відштовхування задовольняє критичну умову $V_{\max} \geq 20k_B T$. Це означає, що енергетичний бар'єр є достатньо високим, щоб протидіяти силам молекулярного притягання Ван-дер-Ваальса, які стрімко зростають при зближенні наночастинок.

Одним із найважливіших результатів є обґрунтування кінетичної стабільності через домінування броунівського руху. При переході системи від грубої дисперсії до нанодисперсного стану відбувається квадратичне зниження швидкості осадження згідно із законом Стокса. За умови досягнення нанорозміру енергія теплового руху частинок стає значно вищою за роботу гравітаційних сил. Це дозволяє системі перебувати у стані динамічної рівноваги.

Отже, стабільність конопляної наноемульсії базується на виконанні двох фундаментальних фізичних умов агрегативної та кінетичної стійкості. Агрегативна стійкість, як сумарна енергія відштовхування задовольняє критичну нерівність $V_{\max} \geq 20k_B T$, що гарантує цілісність оболонок при випадкових теплових зіткненнях часток. Умова кінетичної стійкості за рахунок наноструктурного диспергування за якого енергія броунівського руху починає домінувати над гравітаційним осадженням за законом Стокса.

На відміну від існуючих підходів, що базуються на додаванні екзогенних гідроколоїдів (гуарова камедь, карагінан), які можуть негативно впливати на здоров'я та органолептичні властивості, представлена модель доводить, що керована фізична деструкція та морфологічна трансформація компонентів на мікро- та нанорівнях дозволяють отримати самостабілізовану систему, яка зберігає однорідність протягом терміну зберігання.

ВИСНОВКИ. Розроблено та теоретично обґрунтовано узагальнену фізичну модель морфологічної трансформації конопляної емульсії під дією ультразвуку, яка пояснює механізм формування стійкої системи без використання сторонніх добавок. Це дозволяє забезпечити кінетичну стабільність напою, використовуючи лише внутрішній ресурсний потенціал насіння конопель.

Встановлено, що кінетична стабільність конопляної емульсії досягається завдяки інтенсивному диспергуванню жирової фази та модифікації білка едестину під дією

ультразвукової кавітації. Доведено, що денатураційна активація едестину сприяє вивільненню сульфгідрильних груп та утворенню міжмолекулярних дисульфідних містків, що призводить до формування навколо жирових крапель суцільної в'язко-пружної оболонки.

Обґрунтовано агрегативну стабільність напою через виконання умови розширеної теорії ДЛФО $V_{\max} \geq 20k_B T$ та підтверджено його седиментаційну стійкість, зумовлену домінуванням енергії теплового броунівського руху над гравітаційними силами згідно із законом Стокса.

Подяки. Немає.

Конфлікт інтересів. Немає.

References

- Amine, C., Dreher, J., Helgason, T., & Tadros, T. (2014). Investigation of emulsifying properties and emulsion stability of plant and milk proteins using interfacial tension and interfacial elasticity. *Food Hydrocolloids*, 39, 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.001>
- Antunez-Medina, J. R., et al. (2025). Application of ultrasound in proteins. *Processes*, 13(6), 1646. <https://doi.org/10.3390/pr13061646>
- Bermudez-Aguirre, D., & Niemira, B. A. (2022). Pasteurization of foods with ultrasound: The present and the future. *Applied Sciences*, 12(20), 10416. <https://doi.org/10.3390/app122010416>
- Bernyk, I. M. (2013). Intensification of technological processes for food media processing. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, (3), 109–115.
- Bernyk, I. M. (2019). An innovative approach to obtaining high-quality raw milk. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, (3), 46–55. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2019-3-6>
- Bernyk, I., & Drachyk, I. (2025). Assessment and analysis of methods for obtaining plant-based milk analogues. *Human and Nation's Health*, 3(3), 137–148. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.3.2025.137>
- Bernyk, I., & Drachyk, I. (2025). Theoretical aspects of the energy component of ultrasonic emulsion dispersion. *Human and Nation's Health*, 3(4), 113–124. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2025.113>
- Cao, Y., & Miao, L. (2023). Consumer perception of clean food labels. *British Food Journal*, 125(2), 433–448. <https://doi.org/10.1108/BFJ-03-2021-0246>
- Chassaing, B., Cassadante, J., Nicolas, S., Millman, S., Hillani, R., Ji, J., Walker, M. E., & Gewirtz, A. T. (2022). Randomized controlled-feeding study of dietary emulsifier carboxymethylcellulose reveals detrimental impacts on the gut microbiota and metabolome. *Gastroenterology*, 162(3), 743–756. <https://doi.org/10.1053/j.gastro.2021.11.006>
- Damodaran, S., & Parkin, K. L. (2017). *Fennema's Food Chemistry* (5th ed.). CRC Press.
- Günan, K. T., & Ömeroğlu, P. Y. (2025). Evaluation of plant-based milks in vegan muffins: Functional, structural, rheological and nutritional characterization. *Foods*, 14(23), 3989. <https://doi.org/10.3390/foods14233989>
- Huan, Y., et al. (2020). Ultrasound pretreatment increases the bioavailability of dietary proteins. *Food Biophysics*, 15, 409–415. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-09634-y>
- Huang, Y., Li, C., & McClements, D. J. (2025). Recent advances in plant-based emulsion gels: Preparation, characterization, applications, and future perspectives. *Gels*, 11(8), 641. <https://doi.org/10.3390/gels11080641>
- Jie, Y., & Chen, F. (2022). Progress in the application of food-grade emulsions. *Foods*, 11(18), 2883. <https://doi.org/10.3390/foods11182883>

- Jin, Y., & Adhikari, A. (2025). Recent developments and applications of food-based emulsifiers from plant and animal sources. *Colloids and Interfaces*, 9(5), 61. <https://doi.org/10.3390/colloids9050061>
- Justino, H. F. M., et al. (2024). Exploring ultrasound-assisted technique for enhancing techno-functional properties of plant proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 498–511. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16673>
- Kaczmarek, D., Pokora-Carzynska, M., Juszczak, L., Jamroz, E., & Kapusniak, J. (2025). Plant proteins as alternative natural emulsifiers in food emulsions. *Foods*, 14(24), 4291. <https://doi.org/10.3390/foods14244291>
- Kim, T. I., Choi, H. W., & Hahn, J. (2025). Complementary roles of cellulose nanofiber and soy protein isolate for clean-label stabilization of plant-based emulsions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 70385. <https://doi.org/10.1002/jsfa.70385>
- Kovačević, J., Bechtold, T., & Pham, T. (2024). Plant-based proteins and their modification and processing for vegan cheese production. *Macromol*, 4(1), 23–41. <https://doi.org/10.3390/macromol4010002>
- Liu, Y., Keefer, H. M., Watson, M., Best, A. R., & Drake, M. (2026). Clean label, complete, and sustainable: What do consumers know about protein products? *Journal of Dairy Science*, 109(2), 1143–1159. <https://doi.org/10.3168/jds.2025-27311>
- Lopez, C., Weber, M., Rabesona, H., Pérez, J., Artzner, F., & Bizien, T. (2024). Emulsions stabilized by pea protein-rich ingredients as an alternative to dairy proteins for food sustainability: Unveiling the key role of pea endogenous lipids in the surface-induced crystallization of milk fat. *Current Research in Food Science*, 9, 100921. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024>
- Luhovskyi, O. F., & Berynk, I. M. (2010). Ultrasonic cavitation apparatus for the implementation of environmentally safe technology for pectin extraction from secondary plant raw materials. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya Mashynobuduvannia*, (58), 82–86.
- Luhovskyi, O. F., Gryshko, I. A., Zilinskyi, A. I., Shulha, A. V., Movchaniuk, A. V., & Berynk, I. M. (2022). Ultrasonic cavitation technologies: Disinfection and filtration. *Kushnir Yu. V.*
- Luhovskyi, O. F., Shulha, A. V., Berynk, I. M., Gryshko, I. A., Movchaniuk, A. V., & Zilinskyi, A. I. (2022). Ultrasonic technological processes: Spraying and extraction. *Kushnir Yu. V.*
- Luhovskyi, O., Berynk, I., Gryshko, I., Abdulina, D., & Zilinskyi, A. (2021). Mobile equipment for ultrasonic cavitation inactivation of microorganisms in the liquid environment. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 24, 272–281. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59509-8_24
- Mahajan, P., Bera, M. B., & Prasad, K. (2023). Food physics insight: the structural design of foods. *Journal of Food Science and Technology*, 60(6), 1643–1655. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05400-9>
- Malomo, S. A., He, R., & Aluko, R. E. (2014). Structural and Functional Properties of Hemp Seed Protein Products. *Journal of Food Science*, 79(8), C1512–C1521. <https://doi.org/10.1111/1750-3841>
- Maruyama, S., Streletskaia, N. A., & Lim, J. (2021). Clean label: Why this ingredient but not that one? *Food Quality and Preference*, 87, 104062. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104062>
- Mata, S., Maté, J. I., & Angós, I. (2025). Combined effects of carrageenan and konjac gums on the physicochemical properties of a plant-based smoked salmon analog. *Foods*, 14(21), 3793. <https://doi.org/10.3390/foods14213793>
- McClements, D. J. (2015). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.
- McClements, D. J., & Grossmann, L. (2021). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 4049–4100. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12771>

- Mesa, J., Hinestroza-Córdoba, L. I., Barrera, C., Seguí, L., Betoret, E., & Betoret, N. (2020). High homogenization pressures to improve food quality, functionality and sustainability. *Molecules*, 25(14), 3305. <https://doi.org/10.3390/molecules25143305>
- Mondal, J., Lakkaraju, R., Ghosh, P., & Ashokkumar, M. (2021). Acoustic cavitation-induced shear: a mini-review. *Biophysics Reviews*, 13(6), 1229–1243. <https://doi.org/10.1007/s12551-021-00896-5>
- Naimi, S., Viennois, E., Gewirtz, A. T., & Chassaing, B. (2021). Direct impact of commonly used dietary emulsifiers on human gut microbiota. *Microbiome*, 9, 66. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00996-6>
- Nazarenko, I., & Bernyk, I. (2021). Research of the processes of acoustic cavitation technology for processing dispersed media. In *Dynamic processes in technological technical systems* (pp. 94–109). <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.ch6>
- Pandit, A. V., Sarvothaman, V. P., & Ranade, V. V. (2021). Estimation of chemical and physical effects of cavitation by analysis of cavitating single bubble dynamics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 77, 105677. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105677>
- Rawal, K., Annamalai, P. K., Bhandari, B., & Prakash, S. (2025). Engineering plant-based Pickering emulsions as highly stable dairy cream alternatives using a binary mixture of particle stabilisers. *Food Hydrocolloids*, 159, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110604>
- Sarkar, A., & Dickinson, E. (2020). Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 49, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.04.004>
- Somayeh Taghian Dinani, S. T., Zhang, Y., Vardhanabhuti, B., & van der Goot, A. J. (2023). Enhancing textural properties in plant-based meat alternatives: The impact of hydrocolloids and salts on soy protein-based products. *Current Research in Food Science*, 7, 100571. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100571>
- Tang, C. H., Ten, Z., Wang, X. S., & Yang, X. Q. (2006). Physicochemical and functional properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) protein isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(23), 8945–8950. <https://doi.org/10.1021/jf0619176>
- Tian, Y., Sun, F., Wang, Z., Yuan, C., Wang, Z., Guo, Z., & Zhou, L. (2023). Research progress on plant-based protein Pickering particles: Stabilization mechanisms, preparation methods, and application prospects in the food industry. *Food Chemistry: X*, 21, 101066. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101066>
- Wang, X. S., Tang, C. H., Yang, X. Q., & Gao, W. R. (2008). Characterization, amino acid composition and in vitro digestibility of hemp (*Cannabis sativa* L.) proteins. *Food Chemistry*, 107(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.06.064>
- Yang, H., Hua, C. C., & Huang, P. H. (2026). Effect of xanthan, guar, and carrageenan gums on the physicochemical properties of hypoallergenic pea protein-based dysphagia-friendly matrices. *Foods*, 15(2), 284. <https://doi.org/10.3390/foods15020284>
- Yiu, C. C.-Y., Liang, S. W., Mukhtar, K., Kim, W., Wang, Y., & Selomulya, C. (2023). Food emulsion gels from plant-based ingredients: Formulation, processing, and potential applications. *Gels*, 9(5), 366. <https://doi.org/10.3390/gels9050366>
- Zhu, X., et al. (2024). Acoustic cavitation for agri-food applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105, 106850. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106850>