

УДК 637.181

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2025.113>

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ ЕМУЛЬСІЙ

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. Сучасні тенденції розвитку харчової індустрії змінюються під впливом прагнення населення до здорового способу життя. Це є передумовою для проведення наукових досліджень, спрямованих на створення ресурсощадних технологій, які дозволяють відмовитися від внесення технологічних добавок за рахунок ефективного розкриття функціонально-технологічних властивостей основної сировини. Актуальним є вдосконалення процесів диспергування емульсій із застосуванням фізичних методів впливу. Метою роботи є теоретичне обґрунтування енергетичної ефективності використання резонансних режимів ультразвукової кавітації для отримання стабільних дрібнодисперсних емульсій. Проведено порівняльний аналіз методів дроблення дисперсної фази, серед яких виділено акустичний та гідродинамічний вплив. В роботі застосовано методи теоретичного моделювання. На відміну від класичних підходів, методика враховує в'язкість дисперсного середовища та розглядає інтенсивність як інтегральну характеристику процесу. Енергія подрібнення при диспергуванні емульсій визначена як на основі дискретної так і континуальної моделей. Виявлено, що ультразвуковий вплив на оброблювальне середовище залежить не тільки від параметрів апарату, які визначають енергію, а і від в'язкості середовища, діаметру бульбашки, який змінюється від мінімального до максимального значення та пов'язаних з його зміною явищ, таких як, ударні хвилі, мікротечії, акустична турбулентність. Встановлено, що процес диспергування ефективно реалізується в розширеному діапазоні частот 10–40 кГц, що уточнює відомі дані (20–40 кГц). Теоретично обґрунтовано вплив в'язкості емульсії на енергетичний баланс системи, що є елементом наукової новизни. Визначено, що інтенсивність ультразвукового поля є ключовим параметром, який визначає швидкість трансформації енергії в кавітуючому об'ємі. Показано, що застосування саме резонансних режимів диспергування сприяє утворенню кластерів жирових кульок мінімальних розмірів. Це забезпечує термодинамічну стійкість системи без використання додаткових стабілізаторів.

Ключові слова: диспергування, ультразвукова кавітація, стабільність, параметри, енергія, інтенсивність.

UDC 637.181

<https://doi.org/10.31548/humanhealth.4.2025.113>

THEORETICAL ASPECTS OF THE ENERGY COMPONENT OF ULTRASONIC EMULSION DISPERSION

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. Modern trends in the food industry are evolving in response to the population's growing pursuit of a healthy lifestyle. This creates a prerequisite for research aimed at developing resource-saving technologies that enable the elimination of technological additives by effectively unlocking the functional and technological properties of raw materials. Improving emulsion dispersion processes using physical impact methods is currently of great relevance. The aim of this work is the theoretical substantiation of the energy efficiency of using resonant modes of ultrasonic cavitation to obtain stable, finely dispersed emulsions. A comparative analysis of dispersed phase fragmentation methods was conducted, highlighting acoustic and hydrodynamic impacts. Theoretical modelling methods were applied in the study. Unlike classical approaches, the methodology takes into account the viscosity of the dispersion medium and considers intensity as an integral characteristic of the process. The energy of disruption during emulsion dispersion was determined based on both discrete and continuous models. It was revealed that the ultrasonic impact on the treated medium depends not only on the equipment parameters that determine the energy, but also on the medium's viscosity, the bubble diameter (varying from minimum to maximum values), and associated phenomena such as shock waves, microstreaming, and acoustic turbulence. It was established that the dispersion process is effectively realized in an extended frequency range of 10–40 kHz, refining known data (20 – 40 kHz). The influence of emulsion viscosity on the system's energy balance is theoretically substantiated, representing a novel scientific contribution. It was determined that the intensity of the ultrasonic field is a key parameter defining the rate of energy transformation within the cavitating volume. It is demonstrated that the application of resonant dispersion modes facilitates the formation of fat globule clusters of minimal size. This ensures the thermodynamic stability of the system without the use of additional stabilizers.

Keywords: dispersion, ultrasonic cavitation, stability, parameters, energy, intensity.

ВСТУП. Широкий асортимент харчових продуктів виготовляється з використанням емульсійної технології шляхом диспергування однієї фази в іншій об'ємній фазі (McClements D., 2015). Такі продукти, як вершки, морозиво, майонез, масло, безалкогольні напої, оброблене молоко, ароматизоване молоко, десерти, соуси тощо, є емульсіями двох різних фаз, які не змішуються (Friberg et al., 2003). Створення та забезпечення стабільності емульсії, пов'язане з низкою техніко-технологічних викликів. В першу чергу це пов'язано з тим, що харчові емульсії є термодинамічно нестабільними системами, які прагнуть до коалесценції та седиментації в залежності від нативних властивостей складових (Tadros, T., 2013). У сучасних технологіях, з метою забезпечення агрегативної стійкості емульсійних продуктів, виробники

використовують емульгатори та стабілізатори різного походження: природні, синтетичні та модифіковані (Hasenhuettl et al., 2008).

Сучасні тенденції розвитку харчової індустрії зазнають кардинальних змін під впливом прагнення населення до здорового способу життя (Asioli et al., 2017). Це є передумовою для проведення наукових досліджень, спрямованих на створення ресурсощадних технологій, які дозволяють відмовитися від внесення технологічних добавок за рахунок ефективного розкриття функціонально-технологічних властивостей основної сировини (Ashokkumar et al., 2008). Таким чином, актуальною є питання вдосконалення процесів диспергування за використання сучасних фізико-механічних методів впливу на харчові технологічні середовища (Chemat et al., 2019).

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ. Диспергування матеріалів здійснюється із застосуванням гідромеханічних методів (McClements, D. , 2015). Вони ґрунтуються на підведенні зовнішньої механічної енергії, що реалізується у вигляді інтенсивних гідродинамічних сил зсуву, турбулентності та кавітації, забезпечуючи ефективне подрібнення дисперсної фази. Основні способи диспергування приведені на рисунку 1.

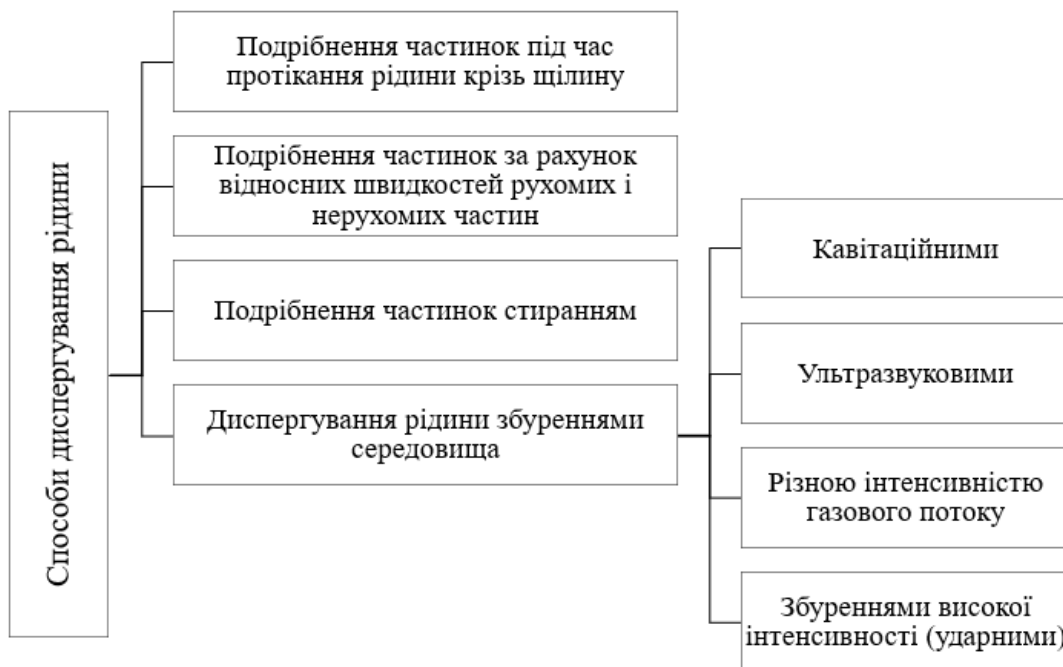


Рисунок 1. Основні способи диспергування

Джерело: розроблено авторами

Дроблення частинок при протіканні рідини через зазор реалізується в клапанному (плунжерному) гомогенізаторі. Принцип дроблення частинок за рахунок відносних швидкостей рухомих і нерухомих частин використовується в колоїдних млинах та дискових роторних апаратах (Håkansson, A., 2019). При диспергуванні в колоїдних млинах визначальним фактором дроблення є відносна швидкість рухомих та нерухомих деталей конструкцій та величина зазору між ними.

Дроблення частинок стиранням спостерігається в апаратах типу струменевий млин. За таким способом зіткнення частинок, що прискорюються різними струменями і що призводять до дроблення дуже мала, то диспергування в цих апаратах відбувається головним чином, за рахунок стирання частинок, що рухаються у вихорах з різними швидкостями. Фактором, що визначає дроблення в них, є не швидкість основного потоку, а градієнт швидкостей у вихрових закручених потоках (Gogate et al., 2001). Якщо в процесі диспергування параметри корпусу

струменевого млина не змінюються, то і масштаби утворювальних вихорів також залишаються незмінними.

Метод дроблення частинок шляхом збурення середовища спостерігається в ряді пристроїв для диспергування шляхом виникаючих кавітаційних явищ. Це, наприклад, відбувається при пропусканні потоку суцільного середовища через канал (сопло), або в ультразвукових пристроях (Carpenter et al., 2017).

Значний вплив ультразвуку на утворення стабільної емульсії зумовлений акустичною кавітацією, під час якої утворення, ріст та сплескування бульбашок призводять до підвищення температури та тиску всередині системи. Зміни температури та тиску в системі призводять до фізичних ефектів, які допомагають підвищити стабільність емульсії. Фізичні сили, такі як ударні хвилі, високий тиск, мікрострумені, сили зсуву та акустичний потік, відповідають за фізичні наслідки під час процесу ультразвукової обробки (Ashokkumar, M., 2011). Внаслідок локального підвищення тиску та ударних хвиль, спричинених акустичною кавітацією, великі краплі емульсії розбиваються на дрібніші. Водночас, під впливом акустичного поля частинки дисперсної фази коливаються з різною швидкістю відносно середовища. Цей вібраційний ефект, зумовлений поширенням хвилі та різницею у швидкостях коливань, створює градієнти тиску, що призводить до зміни гідродинамічних характеристик потоку та сприяє додатковому диспергуванню (Kentish et al., 2008; Khadhraoui et al., 2019).

Процес диспергування в акустичному полі за наявності кавітації відбувається двома способами (Chemat et al., 2011): по-перше, під дією ударних хвиль, що виникають внаслідок колапсу кавітаційних бульбашок; по-друге, під дією мікроструменів рідини, що виникають внаслідок колапсу несферичних кавітаційних бульбашок. Процес формування стабільної емульсії за допомогою ультразвуку залежить від ефективності акустичного процесу, який визначається параметрами системи, до яких належить частота і амплітуда дії, тиск в контактній зоні та швидкість його трансформації в кавітуючому об'ємі суміші (Bernyk I., 2017). Процес емульгування для отримання стабільної емульсії здійснюється використанням частот в діапазоні 20–40 кГц (Li et al., 2017). Аналіз досліджень, проведених в роботах (Bernyk I., 2017; Bernyk et al., 2016) показує, що оптимальна ультразвукова обробка залежить не лише від типу процесу, що реалізується, але й від типу середовища, в якому здійснюються технологічні процеси.

Відповідно до досліджень Deng et al., (2021) ударні хвилі частково розгортають молекули білків, вивільняючи їхні гідрофобні групи. Це дозволяє білкам сировини працювати як високоефективні емульгатори, замінюючи синтетичні добавки.

Незважаючи на відмічені в роботах можливості застосування ультразвукових технологій, існує низка невирішених питань. Так, в роботі (Carpenter et al., 2017) розглядається підведення зовнішньої енергії, але не приведено визначення механізму її трансформації в кавітуючому середовищі. В роботі (Li W. et al., 2017) використовується вузький діапазон частот (20–40 кГц), що звужує потенційну можливість застосування для різних за властивостями емульсій. В більшості моделей, які описують гідродинамічні фактори (градієнт швидкостей, сили зсуву) (Gogate, 2001; Håkansson, 2019), недостатньо уваги приділяється оцінці впливу в'язкості дисперсного середовища на енергетичний баланс процесу. Таким чином, відсутність моделі, яка описує резонансний режим із врахуванням фізико-механічних властивостей емульсії, в тому числі в'язкості є стримуючим фактором підвищення енергетичної ефективності диспергування емульсій. Вирішення проблеми в роботі здійснюється шляхом використання резонансних режимів на етапі сплескування бульбашок та досягненням стабільності емульсії за критерієм інтенсивності поля, який є відображає інтегральну оцінку енергетичної ефективності з урахуванням реологічних властивостей системи фізико-механічними властивостями емульсії (зокрема, в'язкістю).

Виходячи з цього наукова новизна роботи є теоретичне обґрунтування застосування резонансних режимів ультразвукової обробки, що дає можливість керувати дисперсністю та

стабільністю емульсій через енергетичні параметри процесу та відкриває шлях до створення екологічно безпечних харчових продуктів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ – теоретичне обґрунтування енергетичної ефективності використання резонансних режимів ультразвукової кавітації для отримання стабільних дрібнодисперсних емульсій.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ. Матеріалами дослідження використані емульсії: вода, в'язкістю 0,8...1,0 мПа·с, при 20°C та напої, що являють собою аналог молока із в'язкістю мПа·с (соєвий напій) та в'язкістю мПа·с (арахісовий напій). Також базовою емульсією було обрано коров'яче молоко, в'язкістю 1,5 – 2,0 мПа·с (при 20°C). Теоретичні дослідження процесів диспергування базуються на загальноприйнятих класичних положень теорії механічних коливань та теорії суцільних середовищ. Вибір параметрів акустичними коливаннями здійснювалися на визначені амплітуди і частоти коливань, як ключових параметрів інтенсивності, який прийнятий критерієм ефективності диспергування емульсій, оскільки він визначає питому енергію. Дослідження здійснювалися на частотах 10...40 кГц, а амплітуда коливань знаходилася в межах 4,0...10 мкм, Інтенсивність, як питома енергія диспергування емульсії складала величину 1,0...4,4 Вт/см².

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ. При подрібненні жирових кульок в певному об'ємі емульсії можна припустити, що енергія витрачається на утворення нової поверхні, $A_{н.п}$, пружної деформації, $A_{пр.д}$ та пластичної деформації, $A_{пл.д}$. Для визначення енергії на утворення нової поверхні, $A_{н.п}$ існує ряд методів, серед яких найбільш відома гіпотеза Ребіндера, у відповідності до якої робота на утворення нової поверхні, $A_{н.п}$ прямо пропорційна приросту площі нової поверхні ΔS , помноженої на коефіцієнта пропорційності K_s :

$$A_{н.п} = K_s \Delta S \quad (1)$$

де: коефіцієнта пропорційності K_s за розмірністю представляє собою енергію, яка витрачається на одиницю площі нової поверхні ΔS , тобто, Дж/м².

При всій логічності формули (1) її застосування вкрай неможливе, оскільки відсутні числові значення коефіцієнта пропорційності K_s та значення приросту утворення нової поверхні ΔS . Разом з тим, за фізичною сутністю ця гіпотеза є корисною для загального розуміння процесу диспергування. Для визначення енергії A на стабілізацію об'єму емульсій dV при диспергуванні в ній жирових включень можна представити формулою:

$$A = W dV, \text{ Дж} \quad (2)$$

де: W – питома енергія для одиниці об'єму емульсії, Дж/м³.

Одним з методів визначення енергії W є розгляд тиску кавітаційного апарату на емульсію у контактній зоні:

$$AW = \int p dx \quad (3)$$

де p – тиск у контактній зоні, Н/м²; $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – закон зміни деформації в зоні контакту.

Визначимо пружну енергію W за залежністю (3) (рис. 2).

Точка A на діаграмі відповідає деформації жирових включень під дією напруження σ . При наступному невеликому прирості напруження $d\sigma$ виникає нова невелика відносна деформація $d\varepsilon$ з переходом жирових включень в стан, якому на діаграмі деформацій відповідає точка B .

Перехід зі стану A в близький для нього новий стан B потребує витрати елементарної кількості енергії dW , що дорівнює (відносно до одиниці об'єму) добутку діючого в цей момент напруження $\sigma + d\sigma$ на переміщення його точки прикладення $d\varepsilon$:

$$dW = (\sigma + d\sigma)d\varepsilon = \sigma d\varepsilon + d\sigma d\varepsilon.$$

Якщо відкинути член $d\sigma d\varepsilon$ як нескінченно малу величину другого порядку, то елементарна робота:

$$dW = \sigma d\varepsilon.$$

Ця елементарна робота геометрично визначається площею елементарного прямокутника з висотою σ і основою $d\varepsilon$.

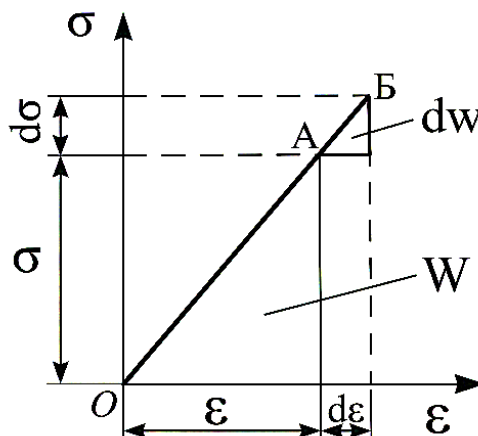


Рисунок 2. Діаграма визначення пружної енергії на руйнування жирових включень
Джерело: розроблено авторами

Застосовуючи такий підхід до всіх елементарних приростів напруження від початку деформації, можна переконалися, що послідовний ряд елементарних прямокутників поступово перекриває всю площу діаграми і вся енергія деформації, що витрачена на одиницю об'єму, дорівнює площі діаграми, обмеженої лініями ординат (напруження) і абсцис (деформації). Отже, витрата енергії на деформацію одиниці об'єму жирових включень може бути знайдена як інтеграл елементарних енергетичних витрат:

$$W = \int dW = \int \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

Повна витрата енергії на деформацію одиниці об'єму жирових включень є питомою енергією деформації. Згідно із законом Гука ($\sigma = E\varepsilon$) знайдемо кінцевий вираз для енергії, враховуючи, що $d\varepsilon = \frac{d\sigma}{E}$:

$$W = \frac{1}{E} \int \sigma d\sigma = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (5)$$

де E – модуль пружності емульсії у контактній зоні; σ – напруження емульсії у контактній зоні.

Визначена питома енергія деформації (5) має розмірність Н/м^2 . Вона тільки зовні збігається із розмірністю напруження, фізично ж вона виражає енергію ($\text{Н} \cdot \text{м}$), віднесену до одиниці об'єму (м^3), тобто $\text{Н} \cdot \text{м/м}^3 = \text{Н/м}^2$.

У наведених залежностях напруження і деформація записані у загальному вигляді, не вказується закон зміни цих параметрів від характеристик процесу диспергування. Проте важливо у загальному контексті визначити й ту частку енергії, що втрачається, тобто перетворюється на теплоту при деформуванні жирових включень.

Тепер визначимо енергію (рис. 3), яка відображається відхиленням прямої зміни напруження від деформації, як при навантаженні, так і при зворотному процесі зняття тиску.

У діаграмі трикутник OAB виражає енергію, необхідну для деформування жирових включень, а площа, обмежена дугами OA і AO , і є та енергія ΔW , що розсіюється всередині включень.

Співвідношення цих енергій $\frac{\Delta W}{W}$ і визначається коефіцієнтом поглинання енергії:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \quad (6)$$

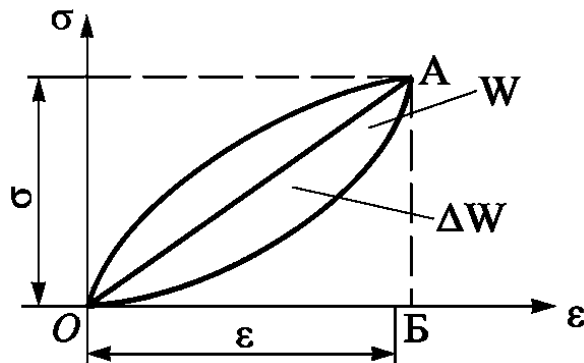


Рисунок 3. Діаграма визначення непружної енергії на руйнування жирових включень
Джерело: розроблено авторами

У рівняння для динамічного розрахунку розсіяння енергії коефіцієнт поглинання завжди входить у вигляді відношення до числа 2π , що характеризує циклічність процесу деформації жирових включень:

$$\gamma = \frac{\psi}{2\pi} \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт дисипативного опору емульсії; Ψ – коефіцієнт розсіяння енергії в емульсії.

У рівняння для напруження і деформацій він входить у вигляді:

$$\sigma = E\varepsilon(1 + i\gamma) \quad (8)$$

де i – умовна одиниця, яка вказує на поворот вектору пружної сили $E\varepsilon$ відносно сили $E\varepsilon\gamma$, що враховує втрату енергії за один цикл напруження, або тиску на жирові включення.

Визначення енергії подрібнення при диспергуванні емульсій побудована на загальних підходах визначення утворення нових поверхонь розглядом дискретних моделей. Процес диспергування емульсій визначення енергії на основі континуальної хвильової теорії, що припадає на одиницю об'єму емульсії, може бути виражена такою залежністю:

$$E_e = \frac{\rho \vartheta^2}{2} = 2\pi^2 \rho f^2 A^2, \quad (9)$$

де E_e – енергія, що припадає на одиницю об'єму емульсії; ρ – щільність емульсії; ϑ – швидкість коливань кавітаційного апарату; f – частота коливань кавітаційного апарату; A – амплітуда коливань в зоні контакту емульсії і кавітаційного апарату.

Енергію ультразвукових хвиль, що припадає на одиницю площі в одиницю часу, прийнято характеризувати інтенсивністю ультразвукових коливань. Коли плоска хвиля падає перпендикулярно до поверхні, то інтенсивність ультразвуку:

$$I = 2\pi^2 \rho c f^2 A^2 = \frac{P_M^2}{2\rho c} \quad (10)$$

де I – інтенсивність ультразвукових коливань; P_M – тиск в зоні контакту; c – швидкість розповсюдження хвиль в емульсії.

Ультразвукові коливання характеризуються рядом параметрів, якими є довжина хвилі λ , швидкість поширення хвилі c , яка пов'язана з довжиною хвилі, періодом коливань T та частотою f наступним співвідношенням:

$$\lambda = cT = c/f \quad (11)$$

Швидкість розповсюдження хвиль залежить від властивостей середовища. Для води та водних розчинів при невисоких концентраціях, тисках та температурах:

$$c = \sqrt{1/(\rho/\beta_{\text{АД}})} \quad (12)$$

де $\beta_{\text{АД}}$ – адіабатна стисливість, Па^{-1} ; ρ – щільність емульсії, кг/м^3 .

Під дією ультразвукових коливань частки емульсії, якими є жирові включення коливаються з прискоренням, що періодично змінюється. Між змінним звуковим тиском та зміщенням частинок емульсії існує певний зв'язок. При гармонійних коливаннях звуковий тиск:

$$p = \rho c \omega A \cos(\omega t - kr) \quad (13)$$

де k – хвильове число; r – відстань до випромінювача, м.

Амплітуда звукового тиску ультразвукового кавітаційного апарату на емульсію визначається за формулою:

$$p_{\text{ак}} = \rho c \omega A \quad (14)$$

де A – амплітуда коливань, м; ω – частота коливань, рад/с .

Аналіз досліджень кавітаційних процесів, проведеними різними авторами (Bernyk I. et al., 2016) засвідчує, що ультразвуковий вплив на оброблювальне середовище є достатньо складним. Цей процес залежить не тільки від параметрів апарату, які визначають енергію, а і від в'язкості середовища, діаметру бульбашки, який змінюється від мінімального R_0 до максимального значення R_m та пов'язаних з його зміною явищ, таких як, ударні хвилі, мікротечії, акустична турбулентність. Вплив параметра R_m/R_0 на ефективність сплескування бульбашки слідує також з простих енергетичних міркувань. У фазі розширення бульбашка набуває потенційну енергію:

$$E = \frac{4}{3} \pi R_{\text{mak}}^3 P_0 \quad (15)$$

де P_c – усереднений тиск в емульсії в процесі сплескування.

Початковий (мінімальний) радіус бульбашки знаходиться в межах $R_0 = (1 - 10) \cdot 10^{-6}$ м, а змінюється при ультразвуковій кавітації в кінці стиснення до числових значень $R_{\text{max}} = 10^{-7} - 10^{-8}$ м, що свідчить про суттєву зміну об'єму бульбашки. Резонансна частота коливань бульбашки визначається за формулою:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{\text{пр}}}{\rho R_0^3} \right] - \left(\frac{2\pi\delta_{\text{пр}}}{\omega} \right)^2} \quad (16)$$

де $\omega_{\text{рез}}$ – резонансна частота коливань бульбашки; γ – коефіцієнт в'язкості бульбашки ρ – щільність емульсії; σ – поверхневий натяг в бульбашці; P_0 – акустичний тиск; $\delta_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт розсіяння енергії; R_0 – початковий радіус бульбашки; $c_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт пружності бульбашки.

Із умови рівності власної частоти (16) вимушеній $\omega_{\text{рез}} = \omega$ отримаємо умову резонансу, при досягненні якої реалізовується процес сплескування бульбашок. При цьому виникають потужні ударні сили, які подрібнюють жирові включення шляхом реалізації максимальної енергії. За реалізації такої ідеї утворюється область у вигляді кластера нових жирових кульок

мінімальних розмірів в стабілізованому положенні. Тому врахування як динамічних параметрів, так і розмірів бульбашок для забезпечення процесу диспергування емульсії та її стабілізації є необхідною умовою при розрахунках. Із врахуванням зазначеного розроблено алгоритм для розрахунку параметрів процесів диспергування емульсії (рис. 4).

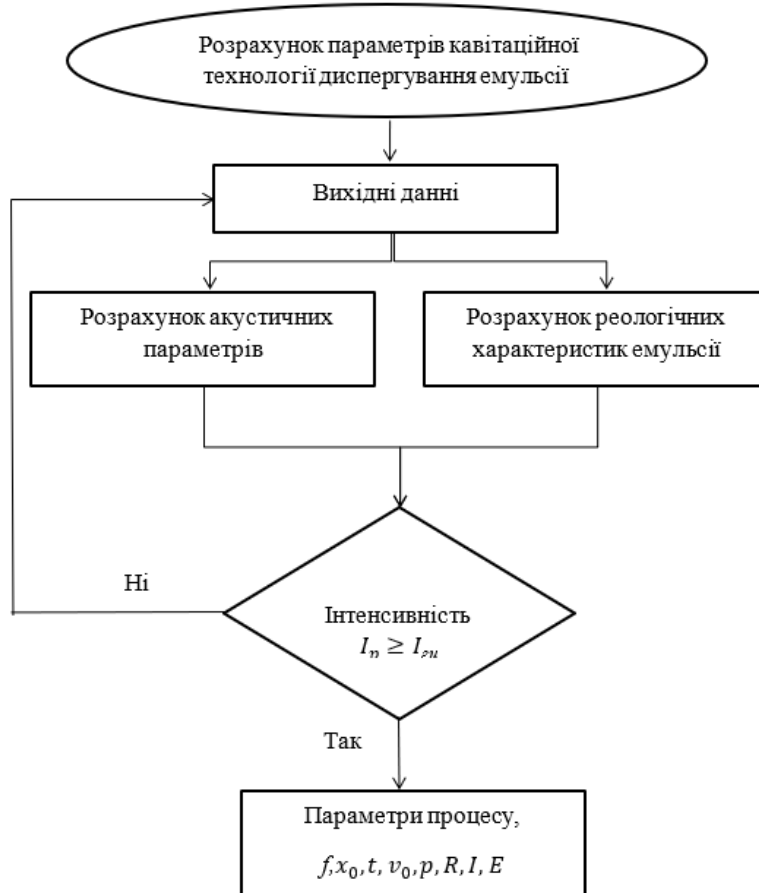


Рисунок 4. Алгоритм розрахунку параметрів ультразвукової кавітаційної технології робочих процесів диспергування емульсії

Джерело: розроблено авторами

Сутність алгоритму полягає у виборі критерія, яким є граничне значення енергії, яка передається від перетворювача ультразвукового апарату в емульсію. На рисунку 5 приведено розрахунок акустичного тиску і інтенсивності від частоти коливань.

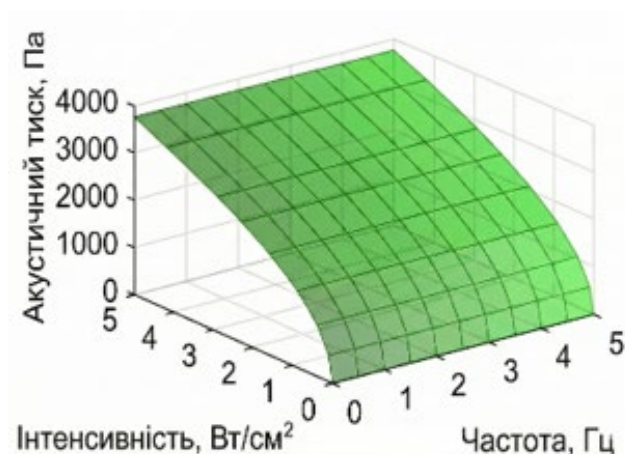


Рисунок 5. Характер зміни акустичного тиску і інтенсивності від частоти коливань

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки щодо диспергування води акустичними коливаннями частоти 20 кГц засвідчили реалізацію резонансного режиму у відповідності до відношення $R_{\max} / R_0$ (рис. 6).

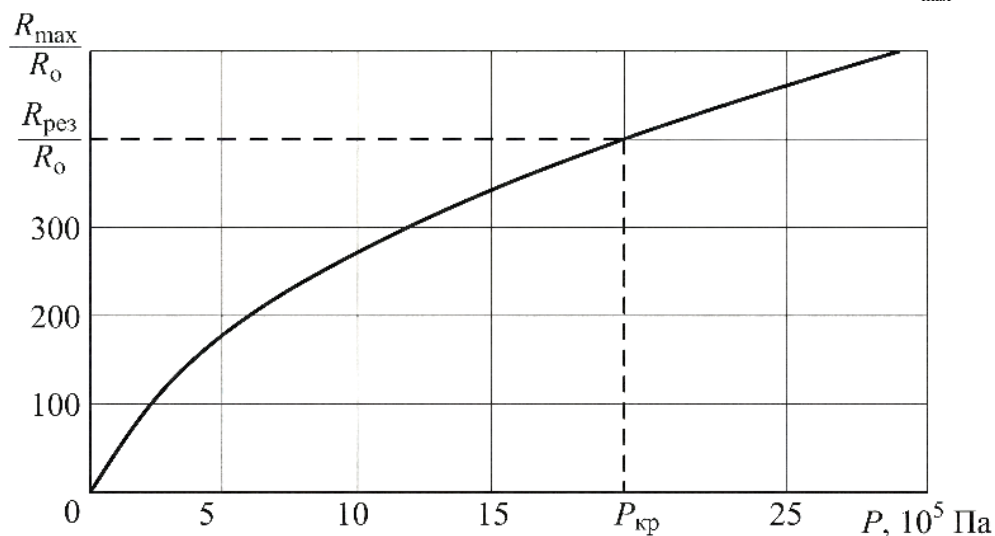


Рисунок 6. Залежність максимального кавітаційних радіусу бульбашок від величини звукового тиску

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що в'язкість емульсії надає значний вплив на визначення параметрів кавітаційного процесу диспергування (табл. 1).

Таблиця 1. Числові значення інтенсивності для емульсій різної в'язкості

Показник	Значення		
В'язкість, η , 10^{-3} Па	10	20	30
Інтенсивність, $I_{\min}$, Вт/см ²	1,0	2,0	2,4
Інтенсивність, $I_{\max}$, Вт/см ²	2,3	3,7	4,5

Джерело: розроблено авторами

При цьому амплітуда коливань для в'язкості $1 \cdot 10^{-3}$ Па·с була 4,0 мкм, а для в'язкості емульсії $5.6 \cdot 10^{-3}$ Па·с амплітуда коливань була 10 мкм.

В обговоренні результатів варто відзначити, що енергія є ключовим критерієм та найбільш важливим параметром реалізації процесу диспергування емульсії в утвореній кавітаційній області. Здійснений підхід в роботі узгоджується із роботою (Carpenter et al., 2017) в якій відмічається про підведення зовнішньої енергії, але не вказується її визначення. Дослідження процес емульгування для отримання стабільної емульсії здійснюється використанням частот в діапазоні 20–40 кГц (Li et al., 2017), що узгоджується із результатами наших досліджень, але в наших дослідженнях досліджено більший діапазон частот: 10–40 кГц. Асортимент харчових продуктів таких, як оброблене молоко, ароматизоване молоко, виготовляється з використанням емульсійної технології шляхом диспергування однієї фази в іншій об'ємній фазі (McClements D., 2015), є емульсіями двох різних фаз, які не змішуються (Friberg et al., 2003) відповідає виконанням дослідженням, а відмінність полягає у врахуванні нами впливу в'язкості емульсії, що є однією із складових новизни роботи. Пояснення виникнення в процесах диспергування таких сил, як ударні хвилі, високий тиск, мікрострумені, сили зсуву та акустичний потік (Ashokkumar, M., 2011), що відповідають за фізичні наслідки під час процесу ультразвукової обробки узгоджуються із результатами досліджень, але використання резонансного режиму приводиться тільки в даній роботі. В роботі (Håkansson, A., 2019) розкривається принцип подрібнення без зазначення передумов та гіпотез подрібнення із

твердженням про вплив швидкості, а в роботі (Gogate et al., 2001) зазначається, що градієнт швидкостей у вихрових закручених потоках є більш важливим фактором. Порівнюючи результати досліджень із результатами розглянутих вище робіт можна зазначити, що саме інтенсивність, як інтегральна характеристика процесу створення та забезпечення стабільності існування емульсії, доповнює згадані вище роботи в частині вибору параметрів. Їх значення в залежності від в'язкості наведено в таблиці. А з енергетичної точки зору застосування резонансних режимів ультразвукового способу диспергування емульсій відкриває можливість забезпечення їхнього стабільного стану утворенням кластера нових жирових кульок мінімальних розмірів.

ВИСНОВКИ. Проведена оцінка існуючих методів подрібнення при диспергуванні емульсій показала, що найбільш адекватною з фізичної точки зору є теорія утворення нових поверхонь, оскільки вона безпосередньо враховує енергетичні витрати на руйнування міжфазної поверхні та формування дисперсної структури емульсії. Застосування даної теорії дозволяє коректно описати процеси, що відбуваються під час інтенсивного механічного та акустичного впливу на дисперсну систему, а також узгоджується з експериментальними спостереженнями зменшення розміру жирових включень.

Розроблена методика дослідження робочих процесів диспергування емульсій базується на використанні фундаментальних положень класичної теорії хвильових процесів, що дало змогу встановити закономірності передачі енергії від ультразвукового перетворювача до технологічного середовища.

Запропонована гіпотеза процесу сплескування кавітаційних бульбашок ґрунтується на реалізації резонансного режиму коливань, за якого досягається максимальна концентрація енергії в локальних об'ємах емульсії. У таких умовах виникають короткочасні, але надзвичайно потужні ударні навантаження, що сприяють ефективному подрібненню жирових включень, руйнуванню агломератів і формуванню стабільної дрібнодисперсної структури.

Розроблено алгоритм розрахунку параметрів ультразвукової кавітаційної технології диспергування емульсій, який базується на визначенні граничного значення енергії, що передається від ультразвукового апарату до емульсії. Встановлено основні технологічні параметри процесу, зокрема робочу частоту, інтенсивність ультразвукового поля та тривалість обробки, що забезпечують досягнення заданого ступеня дисперсності за мінімальних енергетичних витрат.

Перспективним напрямом є розроблення узагальненої математичної моделі, яка б поєднувала хвильові, гідродинамічні та термодинамічні аспекти кавітаційних процесів у багатофазних системах. Також доцільно дослідити можливість масштабування ультразвукової технології для промислових умов та оцінити її енергоефективність у порівнянні з традиційними методами диспергування.

Подяки. Немає.

Конфлікт інтересів. Немає.

References

- Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 864–872. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.016>
- Ashokkumar, M., Sunartio, D., Kentish, S., Mawson, R., Simons, L., Vilku, K., & Versteeg, C. (2008). Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.05.005>
- Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the “clean label” trends: A review of consumer food choice behavior

- and discussion of industry implications. *Food Research International*, 99, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022>
- Bernyk, I. (2017). Theoretical aspects of the formation and development of cavitation processes in technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 19(3), 5–13.
- Bernyk, I., Luhovskyi, O., & Nazarenko, I. (2016). Research staff process of interaction and technological environment in developed cavitation. *Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 1(76), 12–19. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2016.76.39735>
- Carpenter, J., George, S., & Saharan, V. K. (2017). Low-pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil-in-water emulsion: Effect of geometry and cavitation number. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 116, 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.02.013>
- Chemat, F., & Vorobiev, E. (Eds.). (2019). *Green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction*. Academic Press.
- Chemat, F., Zill-e-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Deng, X., Ma, Y., Lei, Y., Zhu, X., Zhang, L., Hu, L., Lu, S., Guo, X., & Zhang, J. (2021). Ultrasonic structural modification of myofibrillar proteins from Coregonus peled improves emulsification properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 76, Article 105659. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105659>
- Friberg, S., Larsson, K., & Sjöblom, J. (2003). *Food emulsions* (4th ed.). Marcel Dekker.
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2001). Hydrodynamic cavitation reactors: A state-of-the-art review. *Reviews in Chemical Engineering*, 17(1), 1–85. <https://doi.org/10.1515/REVCE.2001.17.1.1>
- Håkansson, A. (2019). Emulsion formation by homogenization: Current understanding and future perspectives. *Annual Review of Food Science and Technology*, 10, 239–258. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121501>
- Hasenhuettl, G. L., & Hartel, R. W. (Eds.). (2008). *Food Emulsifiers and Their Applications* (2nd ed.). Springer.
- Kentish, S., Wooster, T. J., Ashokkumar, M., Balachandran, S., Mawson, R., & Simons, L. (2008). The use of ultrasonics for nanoemulsion preparation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(2), 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.07.005>
- Khadhraoui, B., Fabiano-Tixier, A.-S., Robinet, P., Imbert, R., & Chemat, F. (2019). Ultrasound technology for food processing, preservation, and extraction. In F. Chemat & E. Vorobiev (Eds.), *Green food processing techniques: Preservation, transformation and extraction* (pp. 23–56). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815353-6.00002-1>
- Li, W., Leong, T. S. H., Ashokkumar, M., & Martin, G. J. O. (2017). A study of the effectiveness and energy efficiency of ultrasonic emulsification. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20, 86–96. <https://doi.org/10.1039/c7cp07133g>
- McClements, D. J. (2015). *Food emulsions: Principles, practices, and techniques* (3rd ed.). CRC Press.
- Tadros, T. F. (2013). *Emulsion formation and stability*. Wiley-VCH.

Отримано 25.09.2025 р., прийнято до друку 25.11.2025 р.