

Дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки

І.М. Берник¹ • І.І. Назаренко² • О.Ф. Луговський³

Received: 21 October 2021 / Accepted: 24 November 2021

Анотація. В роботі проведено дослідження ефективності використання кавітаційної енергії в технологічних процесах. Встановлено, що ефективність визначається рядом умов, зокрема максимальним використанням енергії від джерела коливань та мінімальним розсіюванням в елементах конструкції, стійкістю параметрів та режимів роботи ультразвукового технологічного обладнання. За їх врахування запропоновано алгоритм побудови математичної моделі для досліджуваних середовищ. Послідовне з'ясування фізичної сутності та механізму процесу технологічної кавітаційної обробки визначають параметри моделі. За врахування такого підходу досліджено особливості розповсюдження ультразвукових хвиль між випромінювачем і відбивачем. Встановлено, що за умов виникнення в технологічному середовищі ультразвукової кавітації відбуваються суттєві зміни її акустичних властивостей. Врахування даних особливостей є принципово важливими за встановлення режимів та параметрів кавітаційної обробки. Вихідною величиною для розрахунків системи “кавітатор – середовище” є опір навантаження технологічного середовища.

Ключові слова: кавітація, хвильовий опір, режими, модель, реологічні властивості, акустичні параметри, ефективність обробки.

Вступ

Ультразвукова кавітаційна обробка рідинно-дисперсних середовищ займає чільне місце в ряду передових і ефективних методів. Реалізується такий метод для низки технологічних процесів, зокрема диспергування, емульгування, гомогенізація, дегазація і інші [1–6]. Кавітація відноситься до вібраційних процесів, які широко застосовується в харчовій [1–3], хімічній [4, 5], машинобудування [6], будівельній [7], та інших галузях промисловості. Загальноприйнятим визначенням кавітації, як фізичного явища, вважається процес утворення порожнин (певного розміру бульбашок) в потоці рідини під дією зовнішнього тиску. Під дією зовнішніх сил в оброблювальному середовищі виникають

хвилі стискування та розтягування, що і реалізують той чи інший технологічний процес обробки технологічного середовища. Процес кавітації обумовлений різкою змінною характеристик поля швидкостей і тисків порожнин рідинного середовища, які і є ключовими параметрами. Зародками можуть бути дрібні бульбашки газу, нерозчинені в рідині, а також незмочуванні тверді частинки. Під дією ультразвукових коливань утворені бульбашки проходять певні стадії свого розвитку та визначаються конкретним значенням амплітуд звукового тиску, який генерується акустичним апаратом [8]. В залежності від рівня інтенсивності ультразвукового випромінювання процес кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ характеризується стадіями зародження, розвиненої кавітації та виродженої. Відсутність кавітації, як і стадія виродженої кавітації, є супутніми. Найбільш важливою є стадія розвиненої кавітації. Вона характеризується утворенням швидкозростаючих парогазових бульбашок, які у фазі стиснення миттєво скорочуються в об'ємі і сплескуються, що і є фінальною частиною процесу ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ. При сплескуванні усередині бульбашки створюються великі тиски до 109 Па, в бульбашці відбуває-

✉ І. М. Берник
iryna_bernyk@ukr.net

¹ Вінницький національний аграрний університет,
Вінниця, Україна

² Київський національний університет будівництва і
архітектури, Київ, Україна

³ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ться розігрів парогазової суміші до 8000...12000 К [9]. Коливання бульбашки характеризуються високою радіальною швидкістю стінок бульбашки [9]. Процес ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ є надто складним і в значній мірі визначається спільною взаємодією кавітаційного апарату і оброблювального середовища і тому визначення цієї взаємодії є однією із ключових проблем дослідження, як задач підвищення ефективності використання кавітаційної енергії в технологічних процесах.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Дослідженню процесів ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ присвячена низка робіт. Основна направленість досліджень полягає у визначенні фізичних та хімічних ефектів в середовищах, що підлягають дії кавітації. Так, в роботі [10] дослідження направлені на встановлення ефектів ультразвуку в водних розчинах, оцінці звуколюмінесценції у водних розчинах. В роботі [11] приведено параметричний огляд сонохімії з точки зору контролю та збільшення сонохімічної активності у водних розчинах. Робота [12] присвячена визначенню хімічних наслідків кавітації. Моделюванню зв'язку кінетики реакції та гідродинаміки в бульбашці, що руйнується, присвячена робота [13]. Отже, основна направленість цитованих робіт полягає у дослідженнях утворення ударних хвиль, теплової енергії, локальну електризацію бульбашок, збудження сонолюмінесценції, утворення вільних радикалів та інші технологічні аспекти кавітаційного процесу утворення та розвитку бульбашок при обробці різних і в тому числі рідинно-дисперсних середовищ. Разом з тим є праці в яких, окрім визначення фізичних та хімічних ефектів в середовищах, розглянуто моделювання кавітаційного процесу, параметри та режими. До таких результатів досліджень варто віднести встановлення порогів кавітації [14], визначення виникаючих тисків у кавітуючих бульбашках [15], розсіювання енергії в кавітаційній області [16], моделювання та визначення аналітичних залежностей, що враховують в'язкі і в'язкопластичні властивості дисперсних середовищ [17]. Разом з тим, в повному об'ємі не розглядався взаємовплив кавітаційного апарату і технологічного середовища при ультразвуковій кавітаційній обробці рідинно-дисперсних середовищ. Мало уваги приділено законам зміни реологічних властивостей технологічних середовищ в процесі їхньої обробки та необхідності оцінки і врахування цих змін в практичних розрахунках. Такі дослідження потребують узгодження сил акустичного апарату з опором середовища, як реакцію на силову дію апарату. Таким чином, можливою основною проблемою застосування ультразвуку високої інтенсивності є дослідження контактної зони взаємодії системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі

визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами. Такий підхід дає можливість розкрити фізичну сутність взаємодії, розробити пропозиції щодо вдосконалення технології та параметрів обробки технологічних середовищ.

Мета і задачі дослідження

Метою досліджень є визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки.

Для досягнення означеної мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки;
- дослідження зміни параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ;
- визначення числових значень режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки.

Виклад основного матеріалу дослідження

Визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки

Хвильовий опір середовища на дію акустичного апарату представляє собою відношення акустичного тиску p_a до коливальної швидкості v частинок середовища:

$$Z_a = \pm p_a / v. \quad (1)$$

Акустичний тиск в контактній зоні системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами можна визначити за методикою, наведеною в роботі [18].

Так, контактний тиск визначається за формулою:

$$p = v_k \rho c K_{x\theta}, \quad (2)$$

де v_k – швидкість коливань контактної зони системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище»; ρ – щільність технологічного середовища; c – швидкість розповсюдження хвиль технологічного середовища в зоні контакту із акустичним апаратом; $K_{x\theta}$ – коефіцієнт, що враховує хвильовий процес за умови, що модель рідини представлена системою з розподіленими параметрами:

$$K_{x_6} = \sqrt{\frac{[\operatorname{sinkl}ch\beta l]^2 - [\cos klsh\beta l]^2}{(k^2 + \beta^2)[(\cos klch\beta l)^2 + (\operatorname{sinklsh}\beta l)^2]}}, \quad (3)$$

Параметри формули (3) k і β враховують пружну та в'язку складову рідинно-дисперсного середовища.

Таким чином вираз (2) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від швидкості коливань контактної зони системи “кавітаційний апарат – технологічне середовище”; в'язкості, товщини шару середовища для різних рідин. В свою чергу швидкість коливань контактної зони залежить від амплітуди коливань акустичного апарату в контактній зоні A_k та частоти коливань цієї зони ω :

$$v_k = A_k \omega$$

Амплітуда звукового тиску пов'язана із інтенсивністю ультразвукових коливань, як ключового параметра кавітаційного процесу, співвідношенням:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} A_k \omega \quad (4)$$

З іншого визначення інтенсивності маємо вираз її зв'язку із амплітудою коливань акустичного апарату та частотою коливань:

$$I = A^2 \omega^2 \quad (5)$$

Важливим параметром є коефіцієнт поглинання енергії, який характеризує зміну питомої енергії P_{num} та інтенсивності ультразвуку I в кавітуючому середовищі:

$$a_n = P_{num} / I. \quad (6)$$

Наведені формули та залежності (1)–(6) враховують параметри та характеристики для визначення та оцінки хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. Таку залежність можна представити в загальному вигляді:

$$F = f\{A, A_i, f, \nu, W, p, l, t, l, p, \sigma, c, E, p, \mu\}, \quad (7)$$

де серед невизначених вище p позначень: F – функціонал (інтегральний критерій); A_i – потокова амплітуда коливань середовища на відстані x_i від границі контактної зони “акустичний апарат – середовище”; f – частота коливань акустичного апарату; W – енергія, P – потужність; t – час; l – характерний розмір середовища у напрямку розповсюдження в ньому акустичної хвилі; σ – напруження в середовищі; E – модуль пружності середовища; μ – коефіцієнт в'язкості середовища.

Дослідження зміни параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ

Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості приведена на рис. 1 [19].

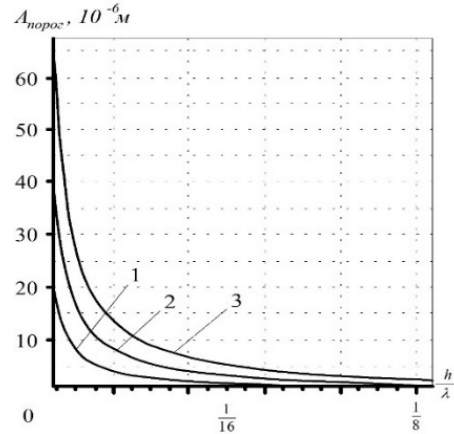


Рис. 1. Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості: 1 – 1 мПа·с; 2 – 200 мПа·с; 3 – 400 мПа·с

Окрім амплітуди коливань випромінювача на параметри кавітаційної обробки середовища здійснюють істотне значення й інші фактори, зокрема, модуль пружності, швидкість звуку в кавітаційній області, відстань від випромінювача, температура і газовміст рідини, склад і концентрація розчинених домішок. Підтвердженням суттєвої зміни співвідношення хвильового опору в процесі кавітаційної дії на технологічне середовище є графіки (рис. 2) можна знати і в роботах [20, 21].

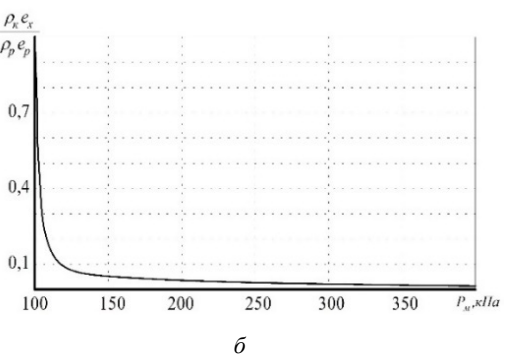
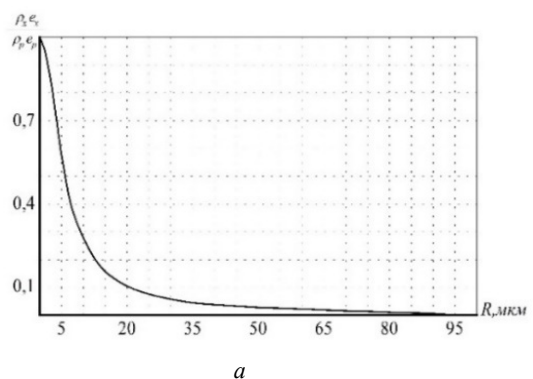


Рис. 2. Залежність зміни хвильового опору: а – від радіусу бульбашки; б – від звукового тиску

На можливість зміни параметрів на стадіях утворення кавітації та її розвитку зазначається і в роботі [22] (рис. 3).

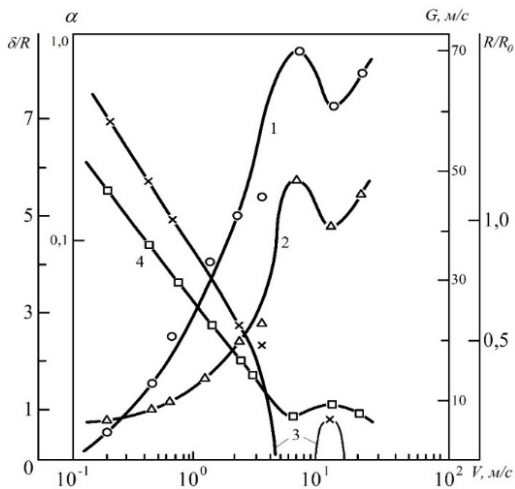


Рис. 3. Зміна параметрів кавітаційного процесу: 1 – індекс кавітації; 2 – відносний розмір газових бульбашок R/R_0 в кавітаційній області; 3 – фазова швидкість звуку c в кавітаційній області; 4 – відносна ширина фронту ударної хвилі δ/R

В момент виникнення кавітації (див. рис. 3, крива 4) швидкість звуку в середовищі близько випромінювача виявляється в 30 разів менше швидкості звуку в рідині і продовжує падати зі збільшенням інтенсивності випромінювання. В таких умовах початок акустичної кавітації (порог кавітації) можна визначити як утворення гідродинамічної нелінійності середовища, що виражається в переході від малих пульсацій газових бульбашок до пульсацій із сплескуванням, а розвинену кавітацію – як процес періодичного поширення гідродинамічного розриву в вигляді фронту хвилі сплескування газових бульбашок. При значенні V біля 4 м/с відбувається перехід до надзвукових рухів акустичного випромінювача. Саме це явище названо в цитованій вище роботі [22] другим порогом акустичної кавітації. Приблизно в цій же області значень V ширина фронту хвилі δ стає менше діаметру газової бульбашки. При цьому, бульбашка настільки швидко потрапляє із зони зниженого тиску в зону підвищеного тиску, що не встигає захлопнутись. Відбувається руйнування фронту хвилі і виникають розриви на хімічному, диспергуючому і інших технологічних процесах кавітації, що виявлені експериментально в [17].

При подальшому збільшенні V розмір газових бульбашок в суспензії наближається до резонансного і збудження прогресивної хвилі стиснення стає неможливим. Графічно це відбивається в тому, що фазова швидкість звуку c спрямовується до нуля. В цей же момент суспензія має найбільший газоміст ($a \rightarrow 1$) і

найбільший розмір газових бульбашок. При значеннях V біля 9 м/с швидкість звуку стає відмінною від нуля і знову формується фронт хвилі сплескування бульбашок. Порушення суцільності рідини під дією зовнішньої сили призводить до утворення нової системи “рідина – бульбашка”. Наявність повітря значно зменшує об’ємний модуль пружності E і швидкість звуку $c_k = \sqrt{E/\rho_k}$. Щільність кавітуючого середовища при цьому зменшується через малу об’ємну концентрацію бульбашок. Падіння швидкості звуку в суспензії газових бульбашок в рідині [23] може призводити до суттєвого зменшення хвильового опору, який визначається наступною залежністю:

$$\rho_k c_k = \rho_0 c_0 \left[\frac{1}{1 + K \beta_{II} / \beta_0} \right]^{1/2} \quad (8)$$

де K – індекс кавітації, β_{II} / β_0 – відношення стисливості парогазової суміші в бульбашках до стисливості рідини, для води $\beta_{II} / \beta_0 \approx 10^4$ [24].

Коефіцієнт індексу кавітації K дорівнює середній за часом об’ємній концентрації бульбашок:

$$K = \frac{\sum_i V_i}{V_p + \sum_i V_i} \quad (9)$$

де V_p – об’єм рідини без бульбашок, V_i – середній об’єм кавітаційної бульбашки, $i = 1, N$, N – число бульбашок.

Із залежності (6) дійсно випливає факт суттєвого зменшення хвильового опору. Так, залежність хвильового опору середовища від індексу кавітації (рис. 4) засвідчує, що при індексі кавітації всього 0,2% хвильовий опір, а отже і амплітуда діючого на бульбашки звукового тиску зменшується майже в п’ять разів. [25, 26].

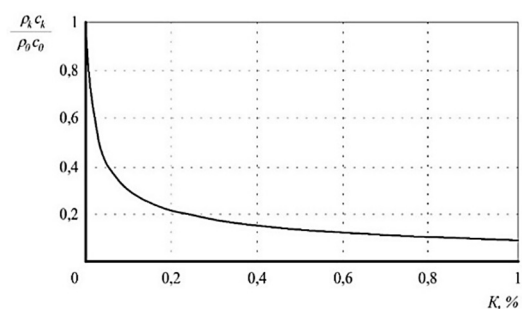


Рис. 4. Залежність зміни хвильового опору середовища від індексу кавітації

Очевидним є той факт, що будь-який етап процесу кавітації представляє собою взаємодію кавітатора з середовищем із суттєвою зміною основних їхніх характеристик. Таким чином, при виникненні в рідині ультразвукової кавітації, її акустичні властивості істотно змінюються, що потребує зміни режиму і параметрів перенесення енергії від ультразвукового випромінювача в технологічне середовище.

Важливим параметром, який здійснює суттєвий вплив на процес кавітації, є швидкість звуку. Суттєва відмінність між значеннями швидкості розповсюдження звуку, що наведені в різних джерелах, очевидно можливо пояснити різними методиками їх визначення. Іншою причиною такої суттєвої відмінності в числових значеннях швидкостей може бути відсутність фіксації тої частини протікання кавітаційного процесу, в якому визначалася ця швидкість.

Для визначення швидкості розповсюдження хвиль в середовищі була розроблена методика та створено експериментальна установка (рис. 5).

Від генератора імпульсів 1 до випромінювача 2 посилається електричний сигнал фіксованої ультразвукової частоти. Датчик, який в даному випадку є випромінювачем і приймачем, перетворює сигнал в пружні коливання тієї ж частоти (зворотний п'єзо ефект), який проходить через шар технологічного середовища. Приймач перетворює пружні коливання ультразвукової частоти в електричний сигнал тієї ж частоти (прямий п'єзо ефект) і подає сигнал на екран комп'ютера 5. На екрані комп'ютера відображені генераторний імпульс і сигнал, що пройшов через трубку із технологічним середовищем. Відстань між ними h характеризує час t проходження пружних коливань від джерела до відбивача і назад. Отже, швидкість розповсюдження хвиль в технологічному середовищі визначалася за формулою:

$$c = h / t \quad (10)$$

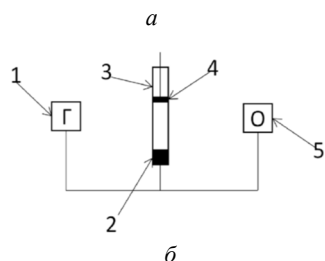
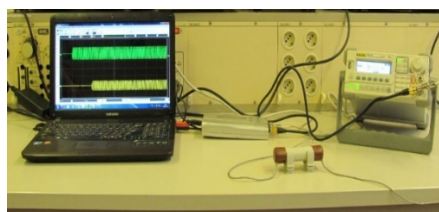


Рис. 5. Вимірювання швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі: *a* – загальний вигляд; *b* – схема; 1 – генератор імпульсів, 2 – випромінювач; 3 – трубка із технологічним середовищем; 4 – відбивач; 5 – комп'ютер

На рис. 6–7 приведені характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів різних технологічних середовищ, обробкою яких визначено швидкість розповсюдження хвиль.

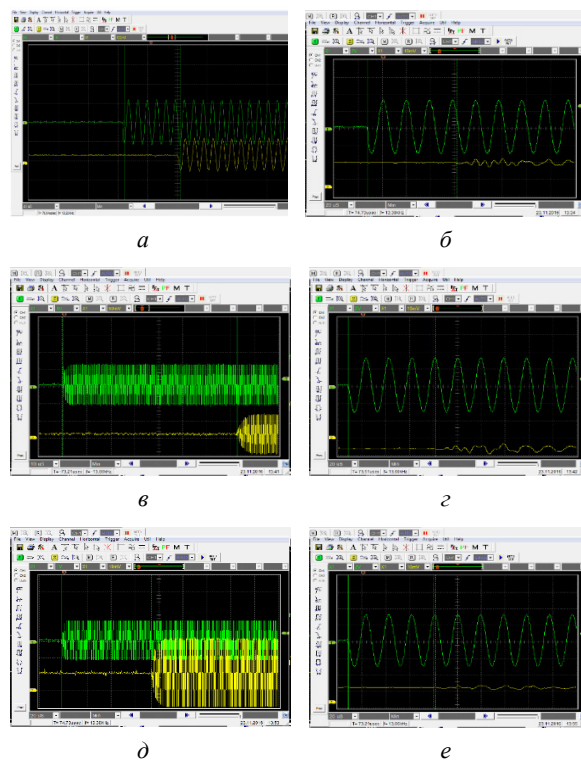


Рис. 6. Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ: вода $f = 2,58$ МГц – *a*, $f = 52$ кГц – *б*; молоко $f = 2,58$ МГц – *в*, $f = 52$ кГц – *г*; олія соняшникова $f = 2,58$ МГц – *д*, $f = 52$ кГц – *е*

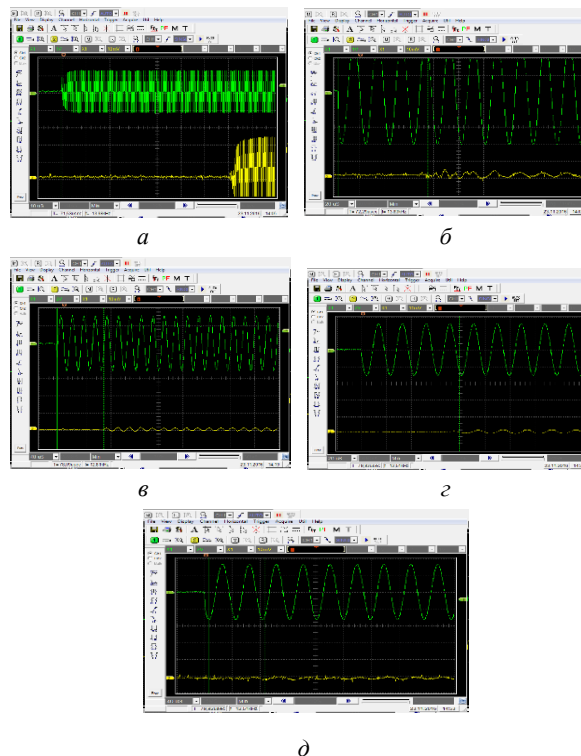


Рис. 7. Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ: сік томатний з м'якоттю $f = 2,58$ МГц – *a*, $f = 52$ кГц – *б*; паста томатна Чумак $f = 52$ кГц – *в*; майонез 75% жирності $f = 52$ кГц – *г*; сиркова маса $f = 52$ кГц – *д*

Отримані результати досліджень засвідчують, що технологічне середовище, безпосередньо взаємодіючи з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням, і зі зміною у часі своїх властивостей є новим джерелом навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок і таке середовище прямо впливає на вибір параметрів ультразвукового кавітатора. При цьому вихідною величиною для розрахунків параметрів системи “кавітатор – середовище” являється саме опір навантаження технологічного середовища.

Рекомендації щодо числових значень режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки

Виконаними дослідженнями визначено, що хвильовий опір рідинно-дисперсних середовищ є основним шляхом інтенсифікації методів акустичної обробки таких середовищ і реалізується шляхом є необхідність не розгляду акустичної системи “кавітатор – технологічне середовище”, як єдину складову всієї системи. На цій основі і запропоновані числові значення режимів і параметрів. Використання визначених конструктивних та технологічних параметри є спроможними реалізувати процес збільшення ступеня концентрації енергії в газових бульбашках з максимальною їх кількістю сплескування в кавітуючому об’ємі технологічного середовища.

В таблиці 1 наведені основні умови виникнення першого та другого порогу кавітації, що враховуються при формуванні алгоритмів і методів режимів і параметрів акустичної дії на технологічні середовища.

Таблиця 1. Основні умови виникнення порогу кавітації

Параметри	перший поріг	стадії кавітації	другий поріг
Швидкість коливаль, v м/с	$V = 0,1$	$1 < v < 5,0$	$v > 5,0$
Інтенсивність I , Вт/см ²	$0,1 < I < 10$	$1 < I < 10$	$I > 10$

Вплив в’язкості найбільш сильно проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і в першу чергу на бульбашки з невеликими радіусами. В’язкість призводить до того, що бульбашки малого радіусу не сплескуються. В таблиці 2 наведені граничні значення інтенсивності для середовища різної в’язкості.

Таблиця 2. Граничні значення інтенсивності для середовища різної в’язкості

В’язкість, η , 10^{-3} Па	20	40	80	100	150	250	300	400
Інтенсивність, I_{\min} , Вт/см ²	1,75	2,00	2,45	2,55	3,75	7,50	12,50	16,00
Інтенсивність, I_{\max} , Вт/см ²	4,35	6,00	7,55	7,75	10,35	17,00	21,55	35,00

Залежність між амплітудою коливаль, в’язкістю та максимальним радіусом бульбашки наведено в таблиці 3, а залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску в таблиці 4.

Таблиця 3. Залежність між амплітудою коливаль, в’язкістю та максимальним радіусом бульбашки

Амплітуда коливаль, мкм	4,0	12,0	20,0
В’язкість, 10^{-3} Па*с	1,0	30,0	50,0
Максимальний радіус бульбашки, мкм	35,0	48,0	60,0
Поверхневий натяг бульбашки, 10^{-3} Н/м	1	72	150

Таблиця 4. Залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску

Величина звукового тиску, 10^3 Па	500	1000	1500	2000	2500	3000
Відношення радіусів бульбашки, R_{\max}/R_0	160	270	350	420	460	520

Висновки

1. Визначено важливість врахування хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ для інтенсифікації процесів ультразвукової кавітаційної обробки. Технологічне середовище, безпосередньо взаємодіючи з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням, і зі зміною у часі своїх властивостей є новим джерелом навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок.

2. Визначено та досліджено зміну параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ. Аналітичні залежності (1)–(10) показують на необхідність враховувати в оцінці параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ умови взаємодії між бульбашками та мати чітке уявлення про ступінь впливу на процес складових тиску, швидкості та співвідношення щільності середовища та бульбашки.

3. Вираз (2) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин. Важливим параметром, що входить в залежність (2) є коефіцієнт, який враховує вплив хвильових процесів, що мають місце в середовищі при її обробці.

4. Приведені числові значення режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. При цьому вихідною величиною для розрахунків параметрів системи “кавітатор – середовище” являється саме опір навантаження технологічного середовища.

References

- [1] O.F. Luhovskyi, *Aparatne zabezpechennia ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021.
- [2] I. Bernyk *et al.*, “Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process”, *Przeglad Elektrotechniczny*, No. 1(4), pp. 32–37, 2019. <https://doi.org/10.15199/48.2019.04.06>
- [3] I. Gryshko and A. Lugovskoy, “Methods of microorganisms inactivation in the technological liquids”, *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, No. 75, pp. 165-171, 2015,
- [4] I.M. Bernyk, “Intensyfikatsiia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky kharchovykh seredovyshech”, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, No. 3(71), pp. 109–115, 2013.
- [5] T.M. Vitenko, *Hidrodinamichna kavitatsiia u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh*, Ternopil: Vydavnytstvo TDTU im. I Puliuia, 2009.
- [6] V.N. Hmelev *et al.* *Primenenie ul'trazvuka vysokoj intensivnosti v promyshlennosti*, Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2010, 203 p.
- [7] Nazarenko I. *et al.*, “Determination of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/7 (108), pp. 71–79, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>
- [8] O.F. Luhovskyi and I.M. Bernyk, “Vstanovlennia osnovnykh parametriv vplyvu tekhnolohichnoho seredovyshecha na robochyi protses ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky”, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, No. 3 (75), pp. 121–126, 2014.
- [9] C.E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, New York: Oxford University Press, 1995.
- [10] M. Pankaj Ashokkumar, *et al.*, “Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems” Springer. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3887-6>
- [11] Richard James Wood, Judy Lee, Madeleine J. Bussemake “A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 38, pp. 351–370, September 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.030>
- [12] Kenneth S. Suslick and J. David, “Flannigan Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation”, *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 59, pp. 659–683. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093739>
- [13] Sudib K. Mishra *et al.*, “Modeling the coupling of reaction kinetics and hydrodynamics in a collapsing cavity”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, pp. 258–265, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.05.014>
- [14] I.M. Fedotkin, I.S. Gulyj, *Kavitaciya, kavitacionnaya tekhnika i tekhnologiya, ih ispol'zovanie v promyshlennosti*, Kiev: AO “GLAZ”, 2000.
- [15] M.G. Sirotyuk, L.R. Gavrilov, *Akusticheskaya kavitaciya*, Moscow: Nauka, 2008.
- [16] I.M. Margulis, M.A. Margulis, “Izmereniya akusticheskoy moshchnosti pri issledovanii kavitacionnykh processov”, *Akust. Zhurn.*, T. 1, No. 6. pp. 802-812, 2005.
- [17] G.N. Kuznecov, I.B. SHCHetkin, “Vliyanie vyazkosti na dinamiku zahlopuvayushchej polosti, dvizhushchejsya postupatel'no”, *Akust. Zhurn.*, vol.19, no. 5. pp.727 – 735, 1973.
- [18] I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi and A. Svidersky, “Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments”, *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 1, pp. 73–86, 2018. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00566>
- [19] I.G. Mihajlov, S.B. Gurevich, “Pogloshchenie ul'trazvukovykh voln v zhidkostyah”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Vol. XXXV, no. 1, Moskva: Fizicheskij institut im. P.N. Lebedeva RAN, 1948.
- [20] M.A. Promtov, “Perspektivy primeneniya kavitacionnykh tekhnologij dlya intensifikacii himiko-tekhnologicheskikh processov”, *Vestnik Tambovskogo gos.tekh. universiteta*, no. 4. pp. 861 – 869, 2008.
- [21] B.A. Agranat, *Fizicheskie osnovy tekhnologicheskikh processov, protekayushchih v zhidkoj faze s vozdejstviem ul'trazvuka*, Moskva: Mashinostroenie, 1969.
- [22] V.P. Monahov *et al.*, “K voprosu o vtorom poroge ul'trazvukovoj kavitacii v vode”, *Akust. zhurn.*, vol. 21, no. 3, pp. 432–435, 1975.

- [23] S.D. Shestakov, “Mnogopuzyr'kovaya akusticheskaya kavitaciya: matematicheskaya model' i fizicheskoe podobie”, *Tekhnicheskaya akustika*, no. 14, 2010.
- [24] M.G. Syrotyuk, “Kavitacionnaya prochnost' vody”, *Trudy akusticheskogo instituta*, vol. 6, pp. 5–15, 1969.
- [25] A.A. Dojnikov, S.T. Zavtrak, “Uchet szhimaemosti zhidkosti v zadache o vzaimodejstvii gazovyh puzyr'kov v pole zvukovoj voln”, *Akustich. zhurn.*, vol. 34, no. 2, pp. 246–250, 1988. <https://doi.org/10.18832/kp1988039>
- [26] V.A. Akulichev, V.N. Alekseev, K.A. Naugol'nyh, “O dinamike parovyh puzyr'kov v zhidkovodorodnyh ul'trazvukovyh puzyr'kovykh kamerah”, *Akust. zhurn.*, vol. 17, no. 3, pp. 356–354, 1971.

Investigation of the impedance of liquid-dispersed environment in the conditions of ultrasonic cavitation treatment

I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi

Abstract. The research of efficiency of use of cavitation energy in technological processes is carried out in the work. It is established that the efficiency is determined by a number of conditions, in particular the maximum use of energy from the source of oscillations and the minimum scattering in the structural elements, the stability of parameters and modes of operation of ultrasonic process equipment. Taking them into account, an algorithm for constructing a mathematical model for the studied environments is proposed. Consistent clarification of the physical nature and mechanism of the process of technological cavitation processing determines the parameters of the model. Taking into account this approach, the peculiarities of the propagation of ultrasonic waves between the emitter and the reflector are investigated. It is established that under the conditions of occurrence of ultrasonic cavitation in the technological environment there are significant changes in its acoustic properties. Taking into account these features is fundamentally important in establishing the modes and parameters of cavitation treatment. The initial value for the calculations of the system “cavitator – environment” is the load resistance of the technological environment.

Keywords: cavitation, wave resistance, modes, model, rheological properties, acoustic parameters, processing efficiency.

Исследование волнового сопротивления жидкостно-дисперсных сред в условиях ультразвуковой кавитационной обработки

И.Н. Берник, И.И. Назаренко, А.Ф. Луговской

Аннотация. В работе проведено исследование эффективности использования кавитационной энергии в технологических процессах. Установлено, что эффективность определяется рядом условий, в частности, максимальным использованием энергии от источника колебаний и минимальным рассеянием в элементах конструкции, устойчивостью параметров и режимов работы ультразвукового технологического оборудования. Предложен алгоритм построения математической модели для изучаемых сред. Последовательное уяснение физической сущности и механизма процесса технологической кавитационной обработки определяют параметры модели. Используя такой подход исследованы особенности распространения ультразвуковых волн между излучателем и отражателем. Установлено, что при возникновении в технологической среде ультразвуковой кавитации происходят существенные изменения ее акустических свойств. Учет данных особенностей принципиально важен при установке режимов и параметров кавитационной обработки. Исходной величиной для расчетов системы “кавитатор – среда” является сопротивление нагрузке технологической среды.

Ключевые слова: кавитация, волновое сопротивление, режимы, модель, реологические свойства, акустические параметры, эффективность обработки.