

Дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями

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

Received: 3 September 2022 / Accepted: 1 October 2022

Анотація. В роботі проведено дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями. В основу виконання досліджень покладена гіпотеза, що визначення ефективних параметрів робочого процесу акустичної обробки реалізується шляхом застосування перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального виду обробки технологічного середовища. Отримані аналітичні залежності дозволяють розрахувати амплітуду коливань та частоту власних коливань. За допомогою вказаних формул представляється можливим визначити зони посилення або ослаблення амплітуди коливань для різних частот коливань. Запропонована формула для визначення частоти власних коливань, яка враховує зміни властивостей середовища від однорідного на початковій стадії до появи кавітаційних бульбашок при визначені частоти власних коливань. Наведені числові значення інтенсивності, тиску, амплітуд коливань, швидкості, прискорення, в'язкості та максимального радіусу бульбашки. Отримані числові значення можуть бути використанні в практичних розрахунках параметрів акустичної обробки різних за своєю природою та властивостям технологічних середовищ.

Ключові слова: кавітаційна бульбашка, рідинне середовище, дискретна та континуальна модель, радіус бульбашки, акустичні параметри, амплітуда та частота коливань, інтенсивність, тиск, власна частота коливань.

Вступ

На сучасному стані, внаслідок наявності високоточних датчиків та фіксуючої апаратури, експериментальне отримання високоенергетичних кавітаційних ефектів не представляє значних труднощів. Варто зазначити експериментально встановлено явище стійких пульсацій одної газової бульбашки, яке характеризується сонолюмінесценцією. Разом з тим, до теперішнього часу не створено повністю адекватної фізичної моделі процесів, що супроводжують пульсації кавітаційної бульбашки на всіх стадіях від зародження до

сплескування. Обумовлюється це тим, що суттєва зміна та вплив реологічних та акустичних параметрів на рух кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі приводить до широкого діапазону змін об'єму бульбашки. За таких умов практично неможливо описати весь комплекс процесів, що відбуваються в рамках якої-небудь однієї моделі. Так, наприклад, рівняння гідродинаміки стають малопридатними для опису кінцевої стадії стиснення бульбашки, оскільки мінімальний розмір бульбашки близький до розмірів кластерів молекул рідини, і умова суцільності середовища стає неможливою. Поведінка газової бульбашки в рідині може проявляти процеси коливань поверхні бульбашки, при яких відбувається порушення сферичної симетрії руху, взаємодія із сусідніми бульбашками, їх дроблення, виникнення кумулятивних мікротечій і т.д. Теоретичним дослідженням кавітаційного процесу динаміки бульбашок присвячені роботи дослідників різних напрямків. Більшість робіт направлені на вдосконалення рівняння Релея, опису стадій зародження, розвитку та сплескування бульбашок, визначення параметрів процесу, дослідженню перетворювачів акустичного апарату. Разом з тим, практично зовсім мало

✉ 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

робіт розгляду спільного руху системи “кавітатор – технологічне середовище”, як системи, що підкорена єдиному віброакустичному процесу. Адже з точки зору хвильової теорії процесів, спільну участь в якому беруть дві практично відмінні за властивостями підсистеми, знехтувати їхньою взаємодією, означає мати недостовірну інформацію.

Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Знання числових значень основних акустичних параметрів та їхньої зміни при протіканні процесу обробки рідинних середовищ, є ключовою задачею вдосконалення та відкриття нових напрямків інтенсифікації кавітаційної технології. При розгляді процесу кавітації вважається, що він складається із наступних основних стадій пульсуючого руху парогазових бульбашок: утворення, розширення, стиснення і сплескування [1–8]. Варто додати ще і стадію осциляції (коливань) бульбашок, які не встигають захлопнутися. Здійснюючи пульсуючий рух, бульбашка може пропустити один або декілька періодів стиснення. Бульбашки протягом великого числа періодів здійснюють коливання біля своїх максимальних розмірів (більш 100–1000 мкм) [6]. За підвищення амплітуди звукового тиску вище деякого критичного значення кавітаційні бульбашки досягають критичних розмірів, при яких відбувається їх виродження в довгоживучі. Цілком очевидно, що наявність таких бульбашок певною мірою знижує ефективність процесу кавітації. Причин такої поведінки бульбашки є декілька, в тому числі і інерційності рідини. Більше того, визначення достовірного значення, так званого, коефіцієнта кавітації [9–14], що являє собою відношення об’єму кавітаційних бульбашок до повного об’єму є умовним. Навіть дослідження динаміки однієї кавітаційної бульбашки по різному здійснюється та трактується в цитованих вище роботах.

Очевидно, що така відмінність може бути пояснена необхідністю врахування можливої взаємодії між бульбашками, що важливо при визначенні параметрів, особливо для реалізації резонансних режимів. Свідченням складного руху кавітаційної бульбашки є зміна її руху у часі, що зазначається в роботі [15]. Такий рух наглядно проілюстрований при імпульсному навантаженні в роботі [16] (рис. 1).

За умов гармонійного навантаження дослідження руху бульбашки [12–14] її рухи в режимі розвиненої кавітації мають стабілізацію, що її об’єм знаходиться певний час в незмінному вигляді. Саме такий стан напередодні сплескування є цікавим з точки зору створення напрямків інтенсифікації визначеного технологією того чи іншого процесу кавітаційної обробки рідинного середовища. І тому основною передумовою є твердження, що визначення ефективних режимів і параметрів робочого процесу акустичної обробки техно-

логічного середовища є застосування поетапної перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального виду (рис. 2).

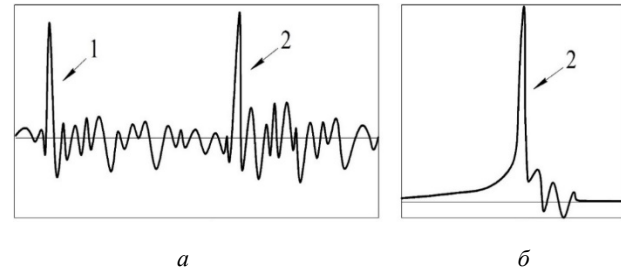


Рис. 1. Імпульси тиску на бульбашку: *a* – у часі росту бульбашки (1) та в момент його сплескування (2); *b* – момент завершення сплескування бульбашки

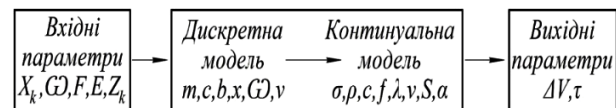


Рис. 2. Структурна схема моделі, що відображає процес протікання акустичної обробки технологічного середовища

Предбачається, що за такої схеми математичні рівняння мають з достовірністю для реальних умов, визначити акустичні параметри руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями. Такими параметрами, що підлягали визначенню являються: амплітуда та частота коливань бульбашки, інтенсивність, тиск, власна частота коливань для забезпечення резонансного режиму за дискретною та континуальною моделями.

Мета і задачі дослідження

Метою досліджень визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною та континуальною моделями.

Для досягнення означеної мети вирішувалися наступні задачі:

- розробка методів дослідження акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі;
- дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною моделлю;
- дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за континуальною моделлю.

Основний матеріал дослідження

Розробка методів дослідження акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі

В нашій роботі [15] було зазначено, що інтегральний критерій оцінки процесу включає наступні акустичні параметри та властивості середовища

$$F = f \{A, A_i, f, v, W, P, L, t, l, p, \sigma, c, E, \rho, \mu\}, \quad (1)$$

де F – функціонал (інтегральний критерій оцінки процесу); A – амплітуда коливань контактної зони “акустичний апарат – середовище”; A_i – потокова амплітуда коливань середовища на відстані x_i від границі контактної зони “акустичний апарат – середовище”; f – частота коливань акустичного апарату; v – швидкість коливань контактної зони “акустичний апарат – середовище”; W – енергія, P – потужність; L – інтенсивність; t – час; l – характерний розмір середовища у напрямку розповсюдження в ньому акустичної хвилі; p – тиск на середовище; σ – напруження в середовищі; c – швидкість розповсюдження акустичної хвилі в середовищі; E – модуль пружності середовища; ρ – густина середовища; μ – коефіцієнт в’язкості середовища.

Інтегральними параметрами функції (1) являються інтенсивність і на її основі – енергія, та потужність [16, 17]. Інтенсивність враховує амплітуду та частоту коливань і може бути представлена через інші параметри кавітаційного процесу:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{1}{2}\rho c \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c}{\omega^2} \alpha^2 = \frac{1}{2} \rho c v_m^2. \quad (2)$$

Отже, за відомим значенням інтенсивності, щільності середовища, частоти коливань, швидкості розповсюдження хвиль, можна отримати числові значення тиску, амплітуди, швидкості та прискорення коливань:

$$p = \sqrt{2\rho c I}; A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; v = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \alpha = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}. \quad (3)$$

Амплітуда коливань є важливим параметром, що суттєво впливає на процес пульсацій кавітаційних бульбашок. За дискретною моделлю для визначення амплітуди коливань і частоти власних коливань використано рівняння:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \sin \omega t, \quad (4)$$

де бульбашка масою m рухається під дією змінної змушуючої сили F ; b – коефіцієнт в’язкого опору; c – коефіцієнт пружності.

Змушуюча сила $F(t)$ змінюється за гармонійним законом з амплітудою F_0 і частотою.

Можна передбачити, що шукана функція переміщення бульбашки виражається рівнянням [18]:

$$x = A_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

де A_0 – амплітуда коливань бульбашки, а φ – кут зсуву фаз між переміщенням і змушуючою силою.

Після підстановки (5) в (4) та нескладних перетворень знайдемо амплітуду сталих коливань x_0 , амплітуди коливань в резонансі x_{0p} , амплітуди коливань в резонансному режимі x_{0zp} , фазового кута α , коефіцієнта демпфування b , власної частоти коливань $\omega_{вл}$, резонансної частоти коливань ω_0 , коефіцієнта динамічності λ_1 мають вигляд:

$$x_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c - m\omega^2)^2 + (b\omega)^2}}; x_{0p} = \frac{F_0}{b\omega}; x_{0zp} = \frac{F_0}{m\omega^2}; \quad (6)$$

$$\alpha = \arctan g \left\{ \frac{b\omega}{c - m\omega^2} \right\}; b = \frac{2\delta m}{T}; \quad (7)$$

$$\omega_{вл} = \sqrt{\frac{c}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}; \omega_0 = \sqrt{c/m}; \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2};$$

Амплітуда коливань впливає на амплітуду звукового тиску P_m , що безпосередньо діє на бульбашку:

$$p_m = \rho_k c_k \omega A, \quad (9)$$

де ρ_k, c_k – щільність і швидкість звуку в кавітуючій рідині. Її значення також можна визначити із (3):

$$A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}. \quad (10)$$

За континуальною моделлю знаходження аналітичної залежності для визначення власної частоти коливань бульбашки використаємо хвильове рівняння:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}, \quad (11)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$ – швидкість поширення хвиль; $x(z, t)$ – переміщення в точці z в момент t щодо початкового положення. Для визначення власної частоти $\omega_{вл}$ знаходяться коефіцієнти A, B частотного рівняння (12) для конкретних граничних умов:

$$x(z) = A \cos \frac{\omega_{вл}}{c} z + B \sin \frac{\omega_{вл}}{c} z. \quad (12)$$

Це рівняння завжди трансцендентне і на відміну від дискретних систем має нескінченне число коренів, тобто нескінченне число власних частот.

Розглянемо граничні умови для схеми (рис. 3, а) і визначимо для цієї схеми власну частоту.

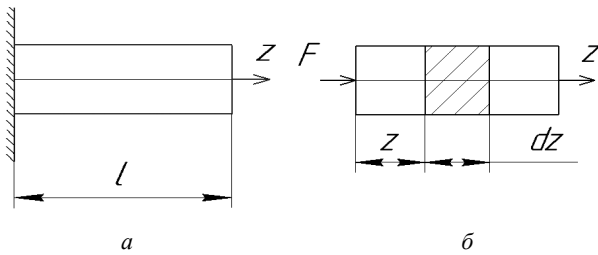


Рис. 3. Розрахункова схема системи з розподіленими параметрами: *a* – схема для визначення власної частоти; *b* – схема дії сили на систему

Так, у кінцевому перерізі $z=0$ переміщення повинно дорівнювати нулю. Тоді $x=0$. На вільному кінці $z=l$ поздовжня сила $F_l=0$, що можливо за умови $\dot{x}=0$. Тобто матимемо:

$$x(0)_{z=0} = 0; \quad \left(\frac{dx}{dz}\right)_{z=l} = 0.$$

Підставимо ці граничні умови у рівняння (12) та отримаємо:

$$A=0; \quad B \frac{\omega_{вл}}{c} \cos \omega_{вл} \frac{l}{c} = 0. \quad (13)$$

Параметр B може мати будь-яке значення за виключенням нуля. Тоді частота може бути найдена з умови, що

$$\cos \omega_{вл} \frac{l}{c} = 0.$$

Це трансцендентне рівняння має нескінченну множину частот:

$$\omega_{вл} = \frac{\pi c}{2l} (2n-1), \quad (14)$$

де $n = 1, 2, \dots, n$.

Наприклад, для першої гармоніки ($n = 1$):

$$\omega_{вл} = \frac{\pi c}{2l} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (15)$$

Дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною моделлю

Використаємо рівняння (4) до опису руху однієї бульбашки в кавітаційній області:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = P_{ak} (4\pi R_0^2). \quad (16)$$

Рівняння (16) було у свій час використано Міннертом, що приведено в роботі [19] для визначення резонансної частоти коливання бульбашки за умови, що коефіцієнт демпфування $b=0$, а маса бульбашки m та

коефіцієнт її пружності c визначалися за залежностями:

$$m = 4\pi R_0^3 \rho; \quad c = 12\pi\gamma R_0 \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right), \quad (17)$$

де ρ – щільність бульбашки, R_0 – розмір бульбашки, p_0 – амплітуда тиску, σ – поверхневий натяг.

Зовнішня сила $F(t)$ була представлена у вигляді:

$$F(t) = p_{ak} (4\pi R_0^2), \quad (18)$$

де p_{ak} – акустичний тиск, який змінюється у часі t за законом:

$$p_{ak} = p_0 \cos \omega t. \quad (19)$$

Використовуючи відому формулу для резонансної частоти одномасної системи $\omega_0 = \sqrt{c/m}$, підставою в нею значень c і m із (17), була отримана Міннертом залежність для визначення резонансної частоти:

$$\omega_0 \cong \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{3\gamma(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0})}{\rho}}. \quad (20)$$

Варто зазначити, що формула (20) отримана для лінійного уявлення процесу руху бульбашки і не враховує зміни пружних властивостей бульбашки, її нелінійної пульсації. Важливо визначити значення амплітуди коливань бульбашки за прийнятими вище допущеннями і передумовами.

Якщо вважати, що переміщення бульбашки здійснюється за законом

$$x = A_0 \cos(\omega t + \alpha), \quad (21)$$

то в результаті підстановки (21) у рівняння (16) із урахуванням (17) отримаємо вираз для визначення амплітуди коливань бульбашки A_0 :

$$A = \frac{P_{am} (4\pi R_0^2)}{\left(12\pi\gamma R_0 \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0}\right)\right) - (\omega^2 4\pi R_0^3 \rho)}. \quad (22)$$

Формулу для визначення амплітуди коливань бульбашки (22) можна представити у вигляді:

$$A = A_0 k_\delta, \quad (23)$$

де A_0 – амплітуда коливань бульбашки в зоні контакту кавітатора з технологічним середовищем, а k_δ – динамічний коефіцієнт підсилення коливань бульбашки:

$$k_\delta = \left[\frac{1}{1 - \Omega^2} \right]. \quad (24)$$

Тут $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$; ω_0 – резонансна частота коливань бульбашки.

Для резонансного режиму коливань бульбашки має виконуватися наступна умова:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = 1, \tag{25}$$

а коефіцієнт динамічності k_d , як це слідує із залежності (25) матиме вигляд:

$$k_d = \frac{1}{0} \rightarrow \infty \tag{26}$$

Амплітуда коливань бульбашки представлена залежністю (22) в резонансні прагне в безкінечність. Отже, отримані залежності засвідчують, що неврахування розсіяння енергії в рівняннях руху бульбашки приводять до у неможливості точно відобразити резонансний режим. Тому врахування розсіяння енергії у формулі для власної частоти коливань $\omega_{вл}$ є необхідною умовою для гарантованого забезпечення резонансного режиму. З цією метою використана формула, в якій враховані пружні (c_{np}) та дисипативні (δ_{np}) властивості бульбашки:

$$\omega_{вл} = \sqrt{\left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{\rho R_0^3} + \frac{2c_{np}}{\rho R_0^3} \right] - \left(\frac{2\pi\delta_{np}}{\omega} \right)^2}. \tag{27}$$

В таблиці 1 наведені числові значення відношення амплітуд коливань бульбашки в залежності від

коефіцієнта демпфірування для різних відношень частот коливань.

Дослідження та визначення акустичних параметрів руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за континуальною моделлю

Формула (14) отримана за континуальною моделлю при певних передумовах, що бульбашка є вільною від взаємодії з іншими бульбашками, відсутністю впливу ультразвукового перетворювача, окрім сили F_l . Тобто формула (14) за структурою та функціональною визначеністю є достовірною в рамках прийнятих граничних умов. Її реальне застосування потребує уточнення ключових параметрів: модуля пружності та щільності бульбашки – їхнього стану, залежності та числових значень на конкретному етапі стадій протікання процесу кавітації і геометричної характеристики, якою є довжина l , в напрямку якої розповсюджується хвиля.

Тому для врахування зміни властивостей середовища від однорідного на початковій стадії до появи кавітаційних бульбашок варто розглядати як нове середовище із змінними у часі параметрами. Тоді застосування формули (14) потребує корекції, яка може трансформована до виду:

$$\omega_{вл} = \frac{\pi}{2l} (2n-1) \sqrt{\frac{(E' + iE'')(t_c)}{\rho(t_c)}}, \tag{28}$$

де t_c – час, що визначає період протікання тої чи іншої стадії обробки технологічного середовища; i – мніма одиниця; E', E'' – дійсна і мніма частина комплексного модуля пружності, які визначаються за формулами:

Таблиця 1. Числові значення відношення амплітуд коливань бульбашки в залежності від коефіцієнта демпфірування для різних відношень частот коливань

№	Коефіцієнт демпфірування, b	Відношення частот коливань, ω/ω_0		Відношення амплітуд коливань, A/A_0	
1	0,005	1.1	0,75	1.1	2,25
		1.2	1,0	1.2	∞
		1.3	1,5	1.3	0.85
2	0,10	2.1	0,75	2.1	2.20
		2.2	1,0	2.2	10.00
		2.3	1,5	2.3	0.92
3	0,15	3.1	0,75	3.1	2.17
		3.2	1,0	3.2	6.75
		3.3	1,5	3.3	0.90
4	0,20	4.1	0,75	4.1	2.11
		4.2	1,0	4.2	4.85
		4.3	1,5	4.3	0.85
5	0,30	5.1	0,75	5.1	1.80
		5.2	1,0	5.2	2.00
		5.3	1,5	5.3	0.67

$$E' = \frac{\left(1 - \alpha^2 \frac{c_k^2}{\omega^2}\right) \rho_k c_k^2}{\left(1 + \alpha^2 \frac{c_k^2}{\omega^2}\right)^2}; E'' = \frac{2\rho_k c_k^2 \alpha \frac{c_k}{\omega}}{\left[1 + \left(\alpha \frac{c_k}{\omega}\right)^2\right]^2}; \quad (29)$$

В (29) коефіцієнт поглинання енергій в середовищі α визначається за залежністю:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\varphi + 1) \rho \omega^2}{2\varphi^2 E'}}, \quad (30)$$

де фазовий кут $\varphi = \frac{E''}{E'}$. Із наведених формул випливає, що вимірюючи швидкість розповсюдження хвиль c_k і коефіцієнт поглинання α , можемо вчислити комплексний модуль пружності. При малому коефі-

цієнті поглинання енергії (мало в'язких середовищ) $\alpha^2 \frac{c_k^2}{\omega} \ll 1$ вираз (29) можна спростити:

$$E' = \rho_k c_k^2; \quad E'' = 2\rho_k c_k^2 \alpha \frac{c_k}{\omega}. \quad (31)$$

Резонансна частота ω_0 за континуальною моделлю визначається за формулою (28).

За результатами досліджень отримані граничні значення інтенсивності для середовищ різної в'язкості (табл. 2), залежність між амплітудою коливань, в'язкістю та максимальним радіусом бульбашки (табл. 3) та залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску (табл. 4), розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску (табл. 5).

Таблиця 2. Граничні значення інтенсивності для середовищ різної в'язкості

Показник	Значення							
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

Таблиця 3. Залежність між амплітудою коливань, в'язкістю та максимальним радіусом бульбашки

Показник	Значення		
Амплітуда коливань, 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

Показник	Значення					
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

Таблиця 5. Розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску

№	Щільність середовища ρ , кг/м ³	Швидкість розповсюдження хвиль в середовищі, c , м/с	Довжина хвилі, λ	Амплітуда коливань, $A \cdot 10^{-2}$ мкм	Амплітуда швидкості, $V \cdot 10^{-3}$ м/с	Амплітуда прискорення, $a \cdot 10^{-3}$ м/с ²	Тиск, $p \cdot 10^3$, Па
1	985	1500	0.068	0,841	116,340	160,825	171,901
2	850	1000	0.045	1.109	153,390	212,035	130,384
3	750	500	0.022	1,670	230,940	319,229	866,025
4	700	400	0.018	1,933	267,600	369,435	748,331
5	650	300	0.014	2,316	320,250	442,691	624,500
6	650	200	0.009	2,837	392,230	542,183	509,902
7	600	100	0.0045	4,176	571,360	798,072	346,410
8	600	50	0.0022	5,906	816,490	1128,640	244,949
9	600	30	0.0013	7,625	1954,090	145,707	189,737

Обговорення результатів досліджень

Формула (20), що отримана Міннетом відображає лінійне уявлення процесу руху бульбашки і не враховує зміни пружних властивостей бульбашки, її нелінійної пульсації. Тому амплітуда коливань бульбашки представлена залежністю (22) в резонансній прагне в безкінечність. Отримані залежності засвідчують, що неврахування розсіяння енергії в рівняннях руху бульбашки приводять до у неможливості точно відобразити резонансний режим. Тому врахування розсіяння енергії у формулі для власної частоти коливань $\omega_{вл}$ є необхідною умовою для гарантованого забезпечення резонансного режиму. Визначені раціональні параметри, що реалізують підвищення ефективності протікання кавітаційного процесу за умов мінімізації енергетичних витрат: граничні значення інтенсивності для середовища різної в'язкості (табл. 2); залежність між амплітудою коливань, в'язкістю та максимальним радіусом бульбашки (табл. 3); залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску (табл. 4); розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску (табл. 5); аналітичні залежності для визначення власних частот коливань за дискретною (27) та континуальною (28). Є певні допущення в отриманих результатах роботи. В дійсності, будь-яке середовище, сприймаючи той чи інший рівень енергії, реагує по-різному. Реакція середовища на вплив синусоїдальної сили не є гармонійною, оскільки середовище, ставши дисперсним, є нелінійним і стає носієм різних, за реологічними властивостями, характеристик. Адже саме наявність субгармонік або супергармонік є характерною рисою нелінійності системи. Цей висновок авторами буде враховано в подальших дослідженнях. В цілому результати досліджень в рамках прийнятих допусків розширюють наші уявлення про процес руху бульбашок в кавітаційній області і можуть бути використанні в практичних розрахунках параметрів акустичної обробки різних за

своєю природою та властивостям технологічних середовищ.

Висновки

1. В основу виконання досліджень покладена гіпотеза, що визначення ефективних параметрів робочого процесу акустичної реалізується шляхом застосування перехідної фізичної моделі від дискретного до континуального виду обробки технологічного середовища.

2. Досліджено та визначено акустичні параметри руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за дискретною моделлю. Отримані вирази (22) та (27) дозволяють розрахувати амплітуду коливань та частоту власних коливань. За допомогою вказаних формул представляється можливим визначити зони посилення або ослаблення амплітуди коливань для різних частот коливань.

3. Досліджено та визначено акустичні параметри руху кавітаційної бульбашки в рідинному середовищі за континуальною моделлю. Отримана формула (14) та (27) для визначення частоти власних коливань. Для врахування зміни властивостей середовища від однорідного на початковій стадії до появи кавітаційних бульбашок при визначенні частоти власних коливань запропонована формула (28).

4. Наведені числові значення: інтенсивності для середовищ різної в'язкості (табл. 2), амплітуди коливань, в'язкість та максимальний радіус бульбашки (табл. 3), залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску (табл. 4), розрахункові значення амплітуд переміщення, швидкості, прискорення та тиску (табл. 5). Отримані числові значення можуть бути використанні в практичних розрахунках параметрів акустичної обробки різних за своєю природою та властивостям технологічних середовищ.

References

- [1] A.F. Lugovskoy and N.V. Chukhrayev, *Ultrazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh*, Kyiv: Kyivskiy universitet, 2007, 245 p.
- [2] A.A. Dolinskij and G.K. Ivanickij, *Teplomassoobmen i gidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sredah. Teplofizicheskie osnovy diskretno-impulsnogo vvoda jenerгии*, Kiev: Naukova dumka, 2008, 381 p.
- [3] N. Bretz, et al., "Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning", *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 703–706, 2005.
- [4] E.A. Brujan and P.R. Williams, "Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids", *Rheology reviews. The British Society of Rheology*, pp. 147–172, 2005.
- [5] A. Juan, "Gallego-Juarez High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances", *Physics Procedia*, No. 3, pp. 35–47, 2010. DOI: doi.org/10.1016/j.phpro.2010.01.006
- [6] T. A. Du, Ch. Huang and Y. Wang, "Numerical Model for Evolution of Internal Structure of Cloud Cavitation", *ISROMAC-2016 (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery)*, April, pp. 10–15, 2016.
- [7] R. Toegel, S. Stefan Luther and D. Lohse, "Viscosity Destabilizes Sonoluminescing Bubbles", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 96, pp. 114–301, 2006. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.114301

- [8] A. Moshaii and R. Sadighi-Bonabi, "Role of liquid compressional viscosity in the dynamics of a sonoluminescing bubble", *Phys. Rev. E*, Vol. 70, pp. 160–304, 2004. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevE.70.016304
- [9] D.J. Flannigan and K.S. Suslick, "Molecular and atomic emission during single bubble cavitation in concentrated sulfuric acid Acoustics", *Research Letters Online*, Vol. 6, No. 3, pp. 157–161, 2005. DOI: doi.org/10.1121/1.1897810
- [10] I.M. Fedotkin and I.S. Gulyy, *Kavitatsiya. kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya. ikh ispolzovaniye v promyshlennosti*, Kyiv: AO "GLAZ", 2000, 684 p.
- [11] R.F. Kunz *et al.*, "A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction", *Computers and Fluids*, No. 29(8), pp. 849–875, 2000. DOI: doi.org/10.1016/S0045-7930(99)00039-0
- [12] A.K. Singhal *et al.*, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", *Journal of Fluids Engineering*, No. 124(3), pp. 617–624, 2002. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1486223
- [13] V.H. Arakeri, "Sonoluminescence and bubble fusion", *Current science*, Vol. 85, No. 7, pp. 911–916, 2003.
- [14] C.E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, New York: Oxford University Press, 1995, 294 p.
- [15] I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi, "Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation", *Materials and technology*, No. 4 (52), pp. 465–468, 2018. DOI: doi.org/10.17222/mit.2017.021
- [16] I.M. Bernyk, O.F. Luhovskyi, "Enerhetyka kavitatsiinoi oblasti", in *Proc. XX Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Hydroaeromekhanika v inzhenerii praktytsi"*. Kyiv NTUU "KPI", 25–29 May, 2015.
- [17] I.M. Bernyk "Vstanovlennia ratsionalnoho rivnia enerhii ta optimalnykh parametriv ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky tekhnolohichnykh seredovyshch", in *Proc. XVII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh" NU "Lvivska politekhnika"*, pp. 47–48, 2018.
- [18] I.I. Nazarenko, *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system*, Kyiv: Vydavnychi Dim "Slovo", 2010, 440 p.
- [19] R.W. Time and A.H. Rabenjaminantsoa, "Cavitation Bubble Regimes in Polymers and Viscous Fluids", *Annual transactions of the Nordic rheology society*, Vol. 19, pp. 9–12, 2011.

Research and determination of the acoustic parameters of the movement of a cavitation bubble in a liquid medium according to discrete and continuous models

I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi

Abstract. In the work, the study and determination of the acoustic parameters of the movement of a cavitation bubble in a liquid medium according to discrete and continuous models was carried out. The research is based on the hypothesis that the determination of the effective parameters of the work process of acoustic processing is implemented by applying a transitional physical model from a discrete to a continuous type of processing of the technological environment. The obtained analytical dependences allow to calculate the amplitude of oscillations and the frequency of natural oscillations. With the help of the specified formulas, it is possible to determine the zones of amplification or attenuation of the amplitude of oscillations for different frequencies of oscillations. The proposed formula for determining the frequency of natural oscillations, which takes into account changes in the properties of the medium from homogeneous at the initial stage to the appearance of cavitation bubbles at the specified frequency of natural oscillations. Numerical values of intensity, pressure, amplitude of oscillations, velocity, acceleration, viscosity and maximum bubble radius are given. The obtained numerical values can be used in practical calculations of acoustic processing parameters of different nature and properties of technological environments.

Keywords: cavitation bubble, liquid medium, discrete and continuous model, bubble radius, acoustic parameters, amplitude and frequency of oscillations, intensity, pressure, natural frequency of oscillations.