

УДК 621.031:664.292

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛЬ В КАВІТАЦІЙНІЙ ОБЛАСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ**I. М. БЕРНИК, О. Ф. ЛУГОВСЬКИЙ***

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, УКРАЇНА

*email: atoll-sonic@ukr.net

АНОТАЦІЯ Використання ультразвуку, що пов'язане з обробкою рідинних середовищ є ефективним механізмом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, яка зумовлена пульсаціями та захопленням кавітаційних бульбашок. Достовірний результат пов'язаний із методами вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в умовах розвиненої кавітації, оскільки вона є складовою практично всіх визначальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Досліджено застосування імпульсних, оптичних, амплітудно-фазових та енергетичних методів для вимірювання швидкості розповсюдження хвиль. Вибір схеми вимірювання обумовлений умовами експерименту. Встановлена суттєва розбіжність в числових значеннях швидкостей потребує застосування більш обґрунтованих моделей, що описують реальні умови протікання кавітаційного процесу дослідження та прийнятих припущень та передумов при постановці та проведенні досліджень.

Ключові слова: ультразвук, швидкість розповсюдження, технологічні середовища, методи вимірювання, кавітаційний процес.

ANALYSIS METHODS OF DETERMINING VELOCITY DISTRIBUTION WAVES IN THE CAVITATION ZONE ULTRASOUND FIELD**I. M. BERNYK, O. F. LUGOVSKOY**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The main parameters of cavitation processing technology environments is the speed of sound in a cavitation medium pressure, the duration, size: cavitation region, bubbles and core. The most successful use of ultrasound associated with handling liquid media, because in them the phenomenon of ultrasonic cavitation, which is an effective mechanism for concentration of energy of sound waves in the low-density high energy density, which is caused by pulsations and cavitation bubbles popping. An important component in ensuring an effective process of cavitation treatment process fluids is to calculate the ultrasonic technological devices that hold for precavitation mode with the following specification obtained by previous studies. However, reliable results associated with the methods of measuring the velocity of ultrasonic waves in a developed cavitation because it is a part of almost all the defining parameters of ultrasonic cavitation processing technology environments. Measuring the velocity of ultrasonic waves carried pulse, optical, amplitude-phase methods. Pulse methods have a wider dynamic range, measurement accuracy independent of the distance between the transmitter and the object opportunity emitter distance from the subject a considerable distance. Amplitude-phase methods require extended frequency band transceiver emitting element and amplifier path that reduces security and selectivity. Frequency and phase methods have the narrow bandwidth receiving radiating path that provides good value energy radiated and received signals, high noise immunity. Is an effective method for determining the rate for power characteristics, the essence of which is to determine the energy flux density and energy density relative to the ultrasound field. It has been found that the accuracy of measuring the speed of sound depends on whether it should receive the absolute value or relative value can restrict the speed of sound when changing any external parameters. Absolute measurement accuracy is about 10^{-5} , while the relative change as accuracy is much higher, it reaches the order of 10^{-7} . The choice of measurement due to the conditions of the experiment. The essential difference in the numerical values of the speed, complicates the acceptance of an opinion on the actual numerical value of speed and requires more informed research in determining the accepted assumptions and preconditions in the formulation and conduct research.

Keywords: ultrasound propagation velocity, technological environment, methods of measurement, cavitation.

Вступ

Основними параметрами кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ є швидкість розповсюдження звуку в кавітаційному середовищі, тиск, час дії, розміри: кавітаційної області, бульбашок та активної зони. Особливе значення має швидкість розповсюдження хвиль, як складовою практично всіх визначальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Тому визначення швидкості є задачею актуальною, а її числові

значення, що адекватно відповідають реальним умовам на всьому етапі створення кавітаційної області, відкривають шляхи до інтенсифікації процесів та вдосконалення ультразвукового обладнання.

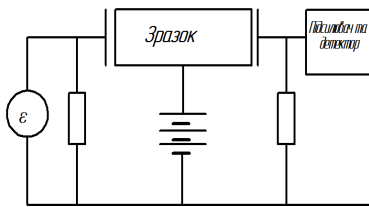
Аналіз стану питання

Методи вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль мають низку переваг і суттєві недоліки (рис. 1) [1-4].

Методи вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль

Резонансний

Заснований на явищі акустичного хвильового резонансу між власними частотами коливач зразка і відповідними частотами зовнішнього генератора. Діапазон – 0,1–15 МГц.

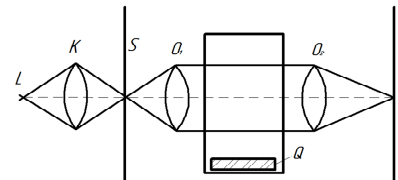


$$v_s = \omega / r = \omega_p l / n\pi = 2\nu_p l / n$$

Оптичний

Заснований на явищі дифракції світла на ультразвуковій решітці. Вимірювання акустичних параметрів виражені залежностями:

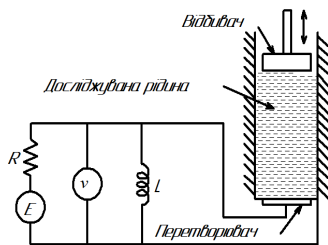
$$\lambda \sin \Theta_n = n\Lambda, \quad \Lambda = A$$



$$v_c = v\lambda,$$

Акустичного інтерферометра

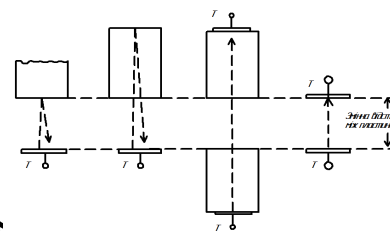
Створення в просторі між випромінювачем і технологічним середовищем інтерференції падаючої і відбитої звукових хвиль.



$$v_c = v\lambda$$

Імпульсний

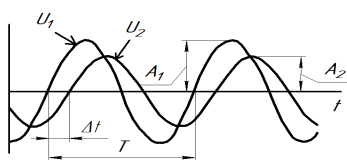
Заснований на дії електричного імпульсу малої тривалості, для генерування та виявлення ультразвукових хвиль в рідинах і твердих тілах широкосмуговим п'єзоелектричним перетворювачем



$$v_s = \Delta l / \Delta \tau$$

Фазовий

На основі вимірювання фази хвилі. Різниця фаз Φ між сигналами джерела і приймача не залежить від часу і виражається функцією відстані та частоти:

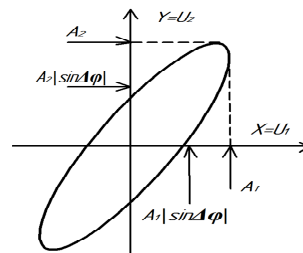


$$\Phi(x, f) = \varphi(0, t) - \varphi(x, t) = kx = \frac{2\pi}{c} fx$$

Для реалізації набули використання: безперервні та імпульсні коливання. Використовується для високоточних вимірювань в режимі біжучої хвилі.

Метод фігур Лиссажу

Порівняння двох сигналів шляхом розгляду замкнутої траєкторії точки, що здійснює одночасно два гармонічні коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках.



$$\Delta x = cN / f$$

$$f = cN / x$$

Рис. 1 – Методи визначення швидкості розповсюдження звукових хвиль у середовищах

Найбільшу точність можна отримати, використовуючи імпульсно-фазові методи [5]. Оптичні методи дозволяють виміряти швидкість хвиль на гіперзвукових частотах (до 1011 – 1012 Гц). Імпульсні методи мають наступні переваги перед інтерферометричним методом: значно ширший динамічний діапазон; незалежність точності вимірювання від відстані між випромінювачем і об'єктом; можливість віддалення випромінювача від об'єкта на значну відстань. У свою чергу, імпульсний і амплітудно-фазовий методи вимагають розширеної

смуги частот приймально-випромінюючих елементів і підсилювального тракту, що знижує захищеність і вибірковість. Частотний і фазовий методи мають найбільш вузьку смугу частот прийому випромінюючого тракту, що забезпечує гарні енергетичні співвідношення випроміненого і прийнятого сигналів, високу перешкодозахищеність. Точність вимірювання швидкості звуку залежить від того, чи треба отримати її абсолютні значення, або ж можна обмежитися відносними значеннями швидкості звуку при зміні яких-небудь зовнішніх

параметрів. Точність $\Delta c/c$ абсолютних вимірювань становить близько 10-5, тоді як точність відносних змін набагато вище, вона досягає величини порядку 10-7. Вибір схеми вимірювання обумовлений умовами експерименту.

Мета роботи

Мета роботи полягає в аналізі та дослідженні існуючих методів визначення швидкостей розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі.

Викладення основного матеріалу

Швидкість розповсюдження пружних хвиль c_k в акустичному середовищі визначається відомою із теорії коливань залежністю [6]:

$$c_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

де E – модуль пружності середовища, що має щільність ρ .

Наведена залежність засвідчує, що за фізичним змістом вона визначає співвідношення пружних (E) і масових (ρ) характеристик середовища. Якщо залежність (1) здебільшого використовується для пружних середовищ, то для рідин, що насичені газом, застосовується формула [7]:

$$c_k = 1/\sqrt{\rho\beta_{ac}}, \quad (2)$$

де β_{ac} – адіабатична стискуваність. Порівнюючи собою співвідносяться як $\beta_{ac} = 1/E$.

Найбільш успішне використання ультразвуку пов'язане з обробкою рідинних середовищ, оскільки саме в них виникає явище ультразвукової кавітації, що є ефективним механізмом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, яка зумовлена пульсаціями та захопленням кавітаційних бульбашок [8-16].

Важливою складовою в забезпеченні ефективної організації процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ є розрахунок ультразвукових технологічних апаратів, який проводять для докавітаційного режиму з наступним уточненням згідно отриманих попередніх досліджень. Разом з тим, як це і зазначалося вище, достовірний результат пов'язаний із методами вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в умовах розвиненої кавітації.

Саме виходячи з цього, визначенню швидкості розповсюдження хвиль присвячена низка робіт [12-16]. Так, в роботах [12, 13] відмічається, що швидкість звуку в технологічних газорідинних середовищах залежить від співвідношення газової і рідинної компонент і, наприклад, для води, яка має газові бульбашки, діапазон зміни c_k коливається в доволі широких межах значень 20...100 м/с [12, 13].

За даними роботи [2] числові значення c_k в

кавітуючій рідині змінюються в більш вузьких межах: $c_k = 25...30$ м/с, а в роботі [14] наводяться числові значення і ще в менших межах $c_k = 10...12$ м/с.

За умови, що кавітаційне середовище складається із рідини з розподіленими в ній парогазовими бульбашками і розглядається, як однорідне двофазне з середніми значеннями щільності температури та тиску, швидкість розповсюдження хвиль визначається за формулою Мелока [13]:

$$c_k = \rho_c c_p^2 / [\rho_p \varphi (1 - \varphi)], \quad (3)$$

де ρ_c, ρ_p – відповідно щільність газу і рідини;

c_p – швидкість звуку в рідині за умови відсутності кавітації;

φ – відношення об'єму газової складової до об'єму газорідинної суміші (об'ємна частина газу в рідині).

Із формули (3) випливає, що числове значення швидкості c_k залежить від співвідношення газової і рідинної складових, як це і було зазначено вище.

Варто зазначити, що для визначення швидкості звуку в рідині, де утворення бульбашок відбувається внаслідок кипіння, в роботі [13] приводиться наступна формула:

$$c_k = p_m L \mu / [\rho_p R T (C_p T)^{1/2}], \quad (4)$$

де p_m – тиск;

L – питома теплота фазового переходу;

C_p – теплоємність рідини;

R – універсальна газова стала;

μ – молярна маса речовини;

T – температура, за якої здійснюється фазовий перехід.

Використовуючи формулу (4), в роботі [16] здійснені розрахунки за числовими значеннями $p_m = 4,7 \cdot 10^4$ Па і $T = 290$ К, які дали значення для $c_k = 0,77$ м/с, а за результатами експериментальних досліджень автора значення $c_k = 2,0 \pm 0,5$ м/с.

Ці значення отримані в результаті розгляду стаціонарного кавітаційного процесу під каналом капіляра.

У роботі [15] приведені результати дослідження за умови, що характеристики кавітуючої рідини, представляються моделлю еквівалентного середовища з бульбашками кавітації, що лінійно коливаються [14]. Для такого середовища середня за період коливання щільність ρ_k і стисливість β_k визначаються згідно залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \rho_k &= \rho_p (1-k) + \rho_c k \\ \beta_k &= \beta_p (1-k) + \beta_c k \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де k – середній за період індекс кавітації;

ρ_c і β_c – щільність і стисливість парогазової

суміші в бульбашках, відповідно;

ρ_p і β_p – щільність і стисливість крапельної рідини, відповідно.

Тут враховано, що щільність парогазової суміші в порожнинах кавітаційних бульбашок значно менша щільності крапельної рідини. Швидкість звуку в середовищі з кавітацією c_k визначалася за формулою (2).

В історичному розвитку опис утвореної кавітаційної порожнини розглядався [14] як самостійної, так і спільної складової загального процесу кавітації. Таким же чином, пояснювався і процес утворення кавітаційного факелу, переріз в основі якого був використаний для градування широкосмугового акустичного інтенсиметру [15].

Автор цієї роботи зазначає, що зміни чутливості інтенсиметру за інтенсивністю поля в середовищі з кавітацією мають бути пропорційними швидкості коливань в більшій частині робочої полоси частот пристрою, що потребує більш аргументованого пояснення, так як це представляє собою багатofакторну задачу. Не піддаючи сумніву проведені експериментальні дослідження, варто зазначити, що значення швидкості c_k , отриманої в роботі [15], має величину 766 м/с, що на три порядки вище, ніж в роботі [16]. На жаль, така розбіжність в значеннях c_k ускладнює прийняття висновку щодо дійсного числового значення швидкості c_k і очевидно необхідні більш обґрунтовані дослідження в тому числі при встановленні прийнятих припущень та передумов при постановці та проведенні досліджень.

Разом з тим, віддаючи належне параметру c_k , зупинимося іще на методі його визначення за енергетичними характеристиками, приведеними в роботі [16]. Сутність методу полягає у визначенні щільності потоку енергії та співвідношенні до щільності енергії ультразвукового поля.

Загальновідомо [1, 2], що щільність потоку енергії, яка переноситься хвилею визначається залежністю:

$$J_0 = p_{\max}^2 / (2\rho c), \quad (6)$$

де p_{\max} – максимальний тиск, за межею якою перевищується поріг кавітації і формується кавітаційна хмара.

А щільність енергії ультразвукового поля в даній області:

$$w_0 = p_{\max}^2 / (2\rho c^2). \quad (7)$$

Порівнюючи залежності (6) і (7) можна отримати формулу для визначення c в даному середовищі:

$$c = J_0 / w_0. \quad (8)$$

Отже, визначивши щільність потоку енергії, що переноситься через кавітуюче середовище I_k і щільність енергії в самому кавітуючому середовищі,

можна знайти значення швидкості розповсюдження звуку c_k в кавітуючому середовищі.

В роботі [16] використано цей підхід при проведенні дослідів на спеціальній експериментальній установці, яка реалізує звукокапілярний ефект.

Аналіз числових даних роботи [16] підтверджує, що суттєвий вплив на швидкість розповсюдження звуку в кавітаційному середовищі має тиск. Його збільшення в 4.0 рази для діаметра капіляру $d=0.34$ мм приводить до збільшення швидкості в 4.8 рази із значення 6,67 м/с до 32,0 м/с. Інші характеристики не мають такого суттєвого впливу.

В цитованій роботі [16] не приводиться можливість виникнення дисперсії фазової швидкості поширення хвиль, яка для плоскої хвилі за даними роботи [2] має вигляд:

$$\frac{\omega_k}{c_k} = \frac{\omega}{c_0} \left(1 + \frac{4\pi R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

де ω – частота хвилі;

c_0, c_k – швидкість звуку в рідині без кавітації і

при наявності кавітації;

n – кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини;

R_0 – рівноважний радіус бульбашки;

ω_0 – резонансна частота бульбашки;

μ – коефіцієнт згасання коливань бульбашки.

Вираз (9) представляє собою хвильовий коефіцієнт з урахуванням дисперсії та розсіяння енергії.

В роботі [17] ця залежність використовується з припущенням, що концентрація бульбашок в рідині невелика. Тому вираз (9) спрощується і приводиться до вигляду:

$$\frac{\omega_k}{c_k} = \frac{\omega}{c_0} \left(1 + \frac{4\pi R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right). \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (10) для області частот $\omega < \omega_0$ відносно переміщення представлено у вигляді графічної залежності переміщення $u(x, \tau) / u_0$ від частоти π (рис. 2) [17].

Отримана графічна залежність (рис. 2) свідчить про наявність вищих гармонік [18], що підтверджує можливість виникнення кавітаційних процесів, де швидкість залежить від частоти коливань, однак в роботі [17] відсутні відомості для яких середовищ таке явище має місце.

Таким чином, проведений всебічний аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль у кавітуючому середовищі та оцінка числових значень швидкостей засвідчує, що на даному етапі не існує загальноприйнятої методики та єдиного уявлення про сутність реального процесу зародження кавітаційної області її розвитку та завершення.

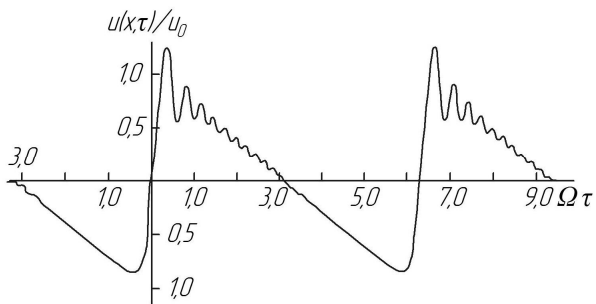


Рис. 2 – Зміна переміщення в залежності від частоти

Висновки

1. Здійснений аналіз методів визначення швидкостей розповсюдження хвиль в дисперсних середовищах засвідчує значну відмінність в їх числових значеннях, що обумовлено відсутністю загальноприйнятої моделі кавітації.

2. Заслугує уваги енергетичний підхід для визначення швидкості розповсюдження хвиль в дисперсних середовищах, однак достовірність результатів розрахунків залежить від точності значень складових формули щільності енергії звукового поля.

3. Виникає необхідність в експериментальній перевірці запропонованих методів визначення швидкості розповсюдження хвиль, уточнення для конкретних технологічних середовищ їхніх числових значень з метою практичного застосування в розрахунках раціональних параметрів та режимів кавітації.

Список літератури

1. Мэзон, У. Физическая акустика / У. Мэзон // *Методы и приборы ультразвуковых исследований*, М.: Мир. – 1966. – Т.1 – С. 327-397.
2. Колесников, А. Е. Ультразвуковые измерения / А. Е. Колесников. – М.: Издательство стандартов. – 1970. – 240 с.
3. Ноздрев, В. Ф. Молекулярная акустика / В. Ф. Ноздрев, Н. В. Федорищенко – М.: Высшая школа, 1974. – 288 с.
4. UA92949 Патент України на винахід, МПК – 2011.01. Спосіб вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у середовищах, що рухаються / Сидоров Г. І. (Україна) G01N29/02; заявл. 05.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 3 с.
5. Зубков, О. В. Метод высокоточного измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущихся средах / О. В. Зубков, К. Н. Полтавский, Г. И. Сидоров // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – 2/9 (56). – С. 8-11.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл. – 1979. – 400 с.
7. Красильников, В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов // М.: Наука. – 1984. – 400 с.
8. Kleiman, J. Benefits of ultrasonic peening treatment in fatigue improvement of welded elements // J. Kleiman, Kudryavtsev Y., Lugovskoy A. / *Proceeding of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Engineering OMAE 2012*. Rio de Janeiro, Brazil. – 2012.
9. Луговской, А. Ф. Ультразвуковая кавитация в

- современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев – К.: Київський університет. – 2007. – 245 с.
10. Хмелев, В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве./ В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2007. – 400 с.
 11. Берник, І. М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки / І. М. Берник, О. Ф. Луговський // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2014. – № 3 (75). – С. 121-126.
 12. Бэтчелор, Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости / Г. К. Бэтчелор // *Механика. Сб. переводов иностранных статей*. – 1968. – 3 (109). – С. 65-89.
 13. Накоряков, В. Е. Распространение волн в газо- и жидкостных средах. / В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейберг // *Новосибирск. Изд-во ИФТ АН СССР*. – 1983. – 237 с.
 14. Розенберг, Л. Д. Кавитационная область / Л. Д. Розенберг // *Мощные ультразвуковые поля*. – М.: Наука. – 1968. – С. 223-265.
 15. Давиденко, Л. А. Приведенные характеристики среды и акустического поля при кавитации / Л. А. Давиденко // *Тр. Одес. политехн. ун-та*. – Одесса. – 2008. – Вып. 1(29). – С. 245-250.
 16. Розина, Е. Ю. Звукокапиллярный метод определения скорости звука в кавитирующей жидкости / Е. Ю. Розина // *Акустичний вісник*. – 2005. – Том 8. – №4. – С. 51-58.
 17. Красильников, В. А. Распространение нелинейных звуковых волн в жидкости при кавитации / В. А. Красильников, В. П. Кузнецов // *Акустический журнал*. – 1974. – № 20 (3). – С. 473-477.
 18. Карпман, В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах / В. И. Карпман. – М.: Наука. – 1973. – 475 с.

Bibliography (transliterated)

1. Mezon, U. Fizicheskaya akustika [Physical acoustics]. *Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy [Methods and tools for ultrasound]*, Moscow: Mir, 1966, 1, 327-397.
2. Kolesnikov, A. Ye. Ul'trazvukovyye izmereniya [Ultrasonic measurement], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1970, 240p.
3. Nozdrev, V. F., Fedorishchenko, N. V. Molekulyarnaya akustika [Molecular acoustics], Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 288 p.
4. UA92949 Patent Ukrayiny na Vynakhid, MPK – 2011,01. Sposob vymiryuvannya shvidkosti Poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvannya u seredovyshche, chto rukhayut'sya [Ukraine patent for invention, IPC - 2011.01. The method of measuring the speed of propagation of ultrasonic vibrations in environments that move], H. I. Sydorov, G01N29/02; zayavl. 05.01.2009; opubl. 27.12.2010, Byul. № 24, 3 p.
5. Zubkov, O. V., Poltavskiy, K. N., Sidorov, G. I. The method of precision measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration in the moving environments, Eastern-European Journ. of Enterprise Technol., 2012, 2/9(56), 8-11.
6. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya [Ultrasound. Little encyclopedia], Moscow: Sov. Entsikl., 1979, 400 p.
7. Krasil'nikov, V. A., Krylov, V. V. Vvedeniye v fizicheskuyu akustiku [Introduction to Physical Acoustics], Moscow: Nauka, 1984, 400 p.

8. **Kleyman, J., Kudryavtsev, Y. U., Lugovskoy, A.** Benefits of ultrasonic peening treatment in fatigue improvement of welded elements, *Proceeding of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Engineering OMAE 2012*. Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
9. **Lugovskoy, A. F., Chukhrayev, N. V.** Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh [Ultrasonic cavitation in modern technologies], Kyiv: Kiïvs'kiy unіversitet, 2007, 245 p.
10. **Khmelev, V. N., Leonov, G. V., Barsukov, R. V., Tsyganok, S. N., Shalunov, A. V.** Ul'trazvukovyye mnogofunktsional'nyye i spetsializirovannyye apparaty dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem khozyaystve [Ultrasonic Multifunctional and Specialized Equipment for Intensification of technological processes in industry, agriculture and households], Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2007, 400 p.
11. **Bernyk, I. M., Lugovskoy, O. F.** Determination of the basic parameters of influence of technological environment on the workflow ultrasonic cavitation treatment, *Vibration in engineering and technology*, 2014, **3(75)**, 121-126.
12. **Betchelor, G. K.** Volny szhatiya v suspenzii gazovykh puzyr'kov v zhidkosti [The compression waves in the suspension of gas bubbles in the liquid], *Mekhanika. Sb. perevodov inostrannykh statey [Mechanics. Coll. translations of foreign articles]*, 1968, **3(109)**, 65-89.
13. **Nakoryakov, V. Ye., Pokusayev, B. G., Shreyberg, I. R.** Rasprostraneniye voln v gazo- i zhidkostnykh sredakh, *Novosibirsk. Izd-vo IFT AN SSSR*, 1983, 237 p.
14. **Rozenberg, L. D.** Kavitatsionnaya oblast'. Moshchnyye ul'trazvukovyye polya [Cavitation region. Powerful ultrasonic fields], Moscow: Nauka, 1968, 223-265.
15. **Davidenko, L. A.** Privedennyye kharakteristiki sredey i akusticheskogo polya pri kavitatsii [These characteristics of the medium and the acoustic field with cavitation]. *Tr. Odes. politekhn. un-ta*, Odessa, 2008, **1 (29)**, 245-250.
16. **Rozenberg, L. D., Yu. Yu.** Zvukokapilyarnyy metod opredeleniya skorosti zvuka v kavitiruyushchey zhidkosti [Zvukokapilyarnyy method of determining the speed of sound in the liquid cavitation], *Akustichnyi visnik [Acoustic Bulletin]*, 2005, **4(8)**, 51-58.
17. **Krasil'nikov, V. A., Kuznetsov, V. P.** Rasprostraneniye nelineynykh zvukovykh voln v zhidkosti pri kavitatsii [Propagation of nonlinear acoustic waves in the fluid in cavitation], *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic magazine]*, 1974, **20(3)**, 473-477.
18. **Karpman, V. I.** Nelineynyye volny v dispergiruyushchikh sredakh [Nonlinear waves in dispersive media], Moscow: Nauka, 1973, 475 p.

Відомості про авторів (About authors)

Берник Ірина Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», докторант кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і мехатроніка»; тел.: (097)513-30-73; e-mail: iryna_bernyk@i.ua

Bernyk Iryna Mykolayivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", doctoral student Department at Applied Hydro-Aeromechanics and Mechatronics; tel. (097)513-30-73; e-mail: iryna_bernyk@i.ua

Луговський Олександр Федорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і мехатроніка»; тел.: (067)250-02-92; e-mail: atoll-sonic@ukr.net

Lugovskoy Oleksandr Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Head of the Department at Applied Hydro-Aeromechanics and Mechatronics; tel. (067)250-02-92; e-mail: atoll-sonic@ukr.net

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Берник, І. М. Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля / **І. М. Берник, О. Ф. Луговський** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 10-15. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

Please cite this article as:

Bernyk, I. M., Lugovskoy, O. F. Analysis methods of determining velocity distribution waves in the cavitation zone ultrasound field. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 10-15, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Берник, И. Н. Анализ методов определения скорости распространения волн в кавитационной области ультразвукового поля / **И. Н. Берник, А. Ф. Луговской** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 10-15. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

АННОТАЦИЯ Использование ультразвука с целью обработки жидкостных сред является эффективным механизмом концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, обусловленного пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. Достоверный результат связан с методами измерения скорости распространения ультразвуковых волн в условиях развитой кавитации, поскольку она является составной практически всех определяющих параметров ультразвуковой кавитационной обработки технологических сред. Исследовано применение импульсных, оптических, амплитудно-фазовых и энергетических методов для измерения скорости распространения волн. Выбор схемы измерения обусловлен условиями эксперимента. Установлено существенное расхождение в числовых значениях скоростей требует применения более обоснованных моделей, описывающих реальные условия протекания кавитационного процесса исследования, принятых допущений и предпосылок при постановке и проведении исследований.

Ключевые слова: ультразвук, скорость распространения, технологические среды, методы измерения, кавитационный процесс.

Надійшла (received) 14.05.2016