

УДК 681.88

А.В. Мовчанюк, канд.техн.наук, А.А. Новосад, М.Ф. Омелич
НТУ України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОФОНІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ КАВІТАЦІЇ АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

Описаны конструкции «стержневого» и «точечного» гидрофонов для исследования интенсивности кавитационных процессов в жидкостях. Приведены экспериментальные данные по сравнению различных конструкций гидрофонов. Выработаны рекомендации по выбору конструкции гидрофона в зависимости от конфигурации ультразвукового поля в технологическом объеме.

The constructions of the "rod" and "point" hydrophones for the intensity of cavitation processes in liquids studying are described. The experimental data on the comparison of different structures of hydrophones are presented. Recommendations on the choice of the hydrophone construction, depending on the configuration of the ultrasonic field in the technological volume are produced.

Вступ Ультразвукова кавітація використовується в технологічних процесах очищення, інтенсифікації хімічних реакцій, дегазації, диспергування, розчинення, запобігання кристалізації тощо. Вимірювання інтенсивності кавітації є актуальною задачею, розв'язання якої дасть змогу створювати системи автоматичного регулювання та контролю кавітаційних технологічних процесів. Одним з найперспективніших методів вимірювання інтенсивності кавітації є акустичний метод. Він базується на реєстрації за допомогою гідрофона акустичного сигналу, що утворюється звуковою хвилею і ударними хвилями від схлопування кавітаційних бульбашок. В подальшому цей сигнал обробляється спеціальними методами спектрального аналізу [1, 2].

Мета дослідження Метою даного дослідження є порівняння даних, отриманих за допомогою різних типів гідрофонів, та визначення областей застосування цих гідрофонів.

Найпоширеніші конструкції гідрофонів схематично показані на рисунку 1.

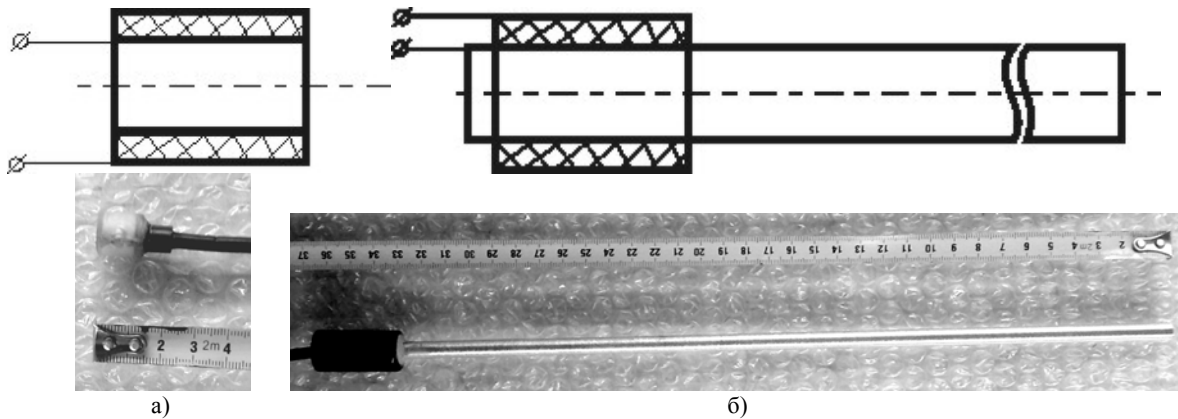


Рис. 1. Конструкції гідрофонів (а-точковий гідрофон; б-стрижньовий гідрофон)

Принцип їх роботи базується на прямому п'єзоелекті. Основу конструкції складає п'єзокерамічний елемент у формі трубки з металізованими твірними, які виконують роль двох обкладінок. Під дією тиску на обкладінках з'являється різниця потенціалів.

Гідрофон (рис.1а) являє собою п'єзоелемент з під'єднаними до обкладінок виводами, вкритий захисною оболонкою з кавітаційностійкого матеріалу. На виході цього гідрофона утворюється напруга, пропорційна коливанням тиску на поверхні п'єзоелемента в тій області простору, де розміщено гідрофон. Гідрофон (рис.1б) відрізняється тим, що аналогічний п'єзоелемент надітий на металевий стрижень. На виході утворюється напруга, пропорційна коливанням тиску, що діє на поверхню п'єзоелемента внаслідок розповсюдження по стрижню поперечних коливань.

Основна частина Звуковий тиск, що діє на гідрофон, пов'язаний з параметрами середовища та параметрами ультразвукової хвилі співвідношенням [3]

$$p = p_0 + A p c \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

де p - звуковий тиск, p_0 - нормальний тиск за відсутності звукового поля, A - амплітуда зміщення частинок середовища відносно стану спокою, ρ - густина, c - швидкість звуку, ω - кутова частота, t - час, x - координата.

Амплітуда коливань звукового тиску

$$P = A \cdot \rho \cdot c \cdot \omega.$$

Енергія, яка проходить через одиницю площі за одиницю часу є інтенсивністю коливань і виражається співвідношенням

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{1}{2} A^2 \rho c \omega^2.$$

Інтенсивність є прямопропорційною потужності акустичних коливань і може бути виражена як відношення потужності акустичних коливань до площі замкненої поверхні, через яку передається ця потужність.

$$I = \frac{W}{S}, \quad (1)$$

де W – потужність акустичних коливань, S – площа поверхні.

Потужність електричного сигналу, який надходить з гідрофону

$$N = W \cdot K = I \cdot S \cdot K = \frac{P^2 S}{2\rho c} \cdot K, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт, який враховує параметри п'єзокераміки та конструкції гідрофону. З співвідношення (2) видно, що потужність електричного сигналу прямо пропорційна квадрату тиску.

Інакше потужність електричного сигналу можна записати

$$N = \frac{U^2}{R}, \quad (3)$$

де U – діюче значення напруги на гідрофоні, R – опір навантаження гідрофону.

Підставивши праву частину (3) в ліву частину (2), можна виразити потужність акустичних коливань

$$W = \frac{U^2}{RK}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (1) отримуємо вираз, що пов'язує інтенсивність акустичних коливань, що приймаються гідрофоном, з напругою на гідрофоні.

$$I = \frac{U^2}{RKS_r}, \quad (5)$$

де S_r - площа поверхні гідрофону.

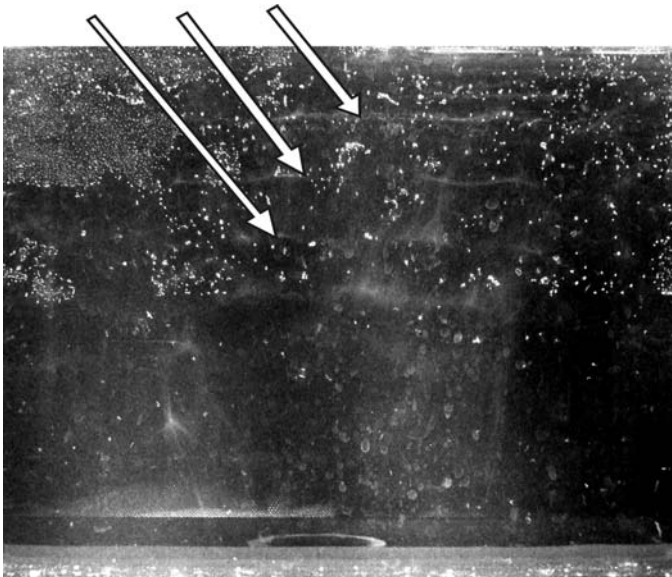


Рис. 2. Фотографія кавітаційної області (стрілками показані скупчення кавітаційних бульбашок)

перетворювач 1, що збуджується генератором 2. По висоті ємності спостерігається неоднорідність поля (рис. 2).

Дані рівняння записані для біжучих хвиль, амплітуда яких не змінюється з координатою. В технологічних ємностях, де збуджується кавітація, в більшості випадків, встановлюється режим змішаних хвиль (наявні біжуча та стояча хвилі). Отже картина акустичного поля досить складна, по об'єму відбувається чергування мінімумів та максимумів амплітуд коливань. Так само утворюються області з різною кількістю кавітаційних бульбашок, а отже і з різною інтенсивністю кавітації (рис. 2).

Внаслідок неоднорідності поля постає питання про те, в якому місці технологічного об'єму розмішувати гідрофон і який тип гідрофонів використовувати.

З метою відповіді на це питання було проведено серію експериментів. В різних точках технологічної ємності (рис. 3) здійснено вимірювання за допомогою двох гідрофонів (рис. 1).

Технологічна ємність має розміри $330 \times 150 \times 220$. До її дна приклеєний резонансний п'єзоелектричний привід-

На першому етапі проводились вимірювання в точках А і В, рівновіддалених від перетворювача. В кожній з цих точок за допомогою обох типів гідрофонів виміряні значення напруги, пропорційні тиску в рідині і, відповідно, квадратному кореню з інтенсивності коливань. Тиск, а отже, і напруга на гідрофоні, матимуть складну (негармонійну) залежність від часу за рахунок появи в рідині різних нелінійних явищ під дією потужних ультразвукових хвиль. Тому цю напругу можна вимірювати лише вольтметрами середньоквадратичного значення, наприклад ВЗ-57. При використанні вольтметрів інших типів похибка вимірювання буде ненормованою.

Порівняння результатів вимірювання можливе на основі порівняння інтенсивностей акустичних коливань в точках вимірювань. При цьому слід звернути увагу на те, що в кожній точці об'єму інтенсивність коливань різна, оскільки різна амплітуда коливань за рахунок наявності стоячих хвиль. Середню інтенсивність коливань по висоті технологічного об'єму можна записати

$$\bar{I} = \frac{1}{l} \int_0^l I(x) dx = \frac{1}{l R K S_{\Gamma}} \int_0^l U^2(x) dx, \quad (6)$$

де l - висота технологічного об'єму.

Гідрофон (рис.1б) сприймає коливання по всій висоті технологічної ємності, тому квадрат напруги на ньому прямопропорційний середньому значенню інтенсивності коливань (6).

Результати вимірювання в точках А і В подано в таблиці 1. Відстань між точками А і В дорівнювала 10 мм. Тут і далі результати вимірювань подано в одиницях напруги, оскільки гідрофони не проградуїровані в одиницях тиску або інтенсивності й значення коефіцієнта K невідомі. Але при порівнянні гідрофонів коефіцієнт K скорочується, так як порівнюються відношення вимірюваних сигналів.

Таблиця 1

№ дослід. Точка							Середнє значення, мВ
A	7	0	5	7	8	4	56,8
B	5	4	8	8	4	5	55,7

Гідрофон (рис.1а) за рахунок малих розмірів (менших за половину довжини хвилі) сприймає коливання в області, близькій до гідрофону. Вимірювання проводились з кроком 5 мм по висоті (рис.4). Видно, що картина поля в точках А і В майже однакова.

Для порівняння результатів вимірювання двома типами гідрофонів необхідно усереднити покази гідрофону (рис. 1а), зняті в різних точках по висоті технологічної ємності. Враховуючи (5) і (6) можна записати

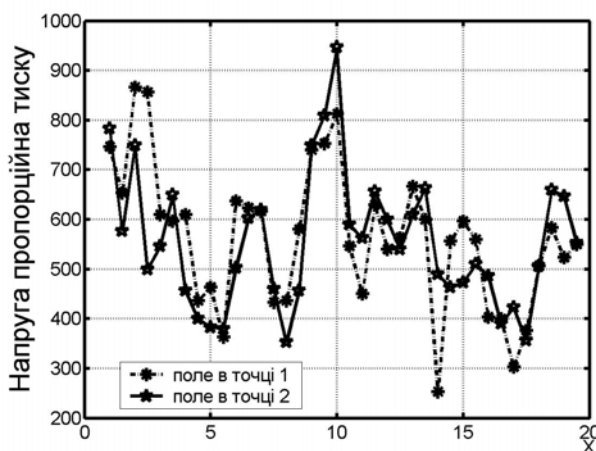


Рис. 4. Розподіл звукового тиску в технологічній ємності в двох сусідніх точках вимірювань

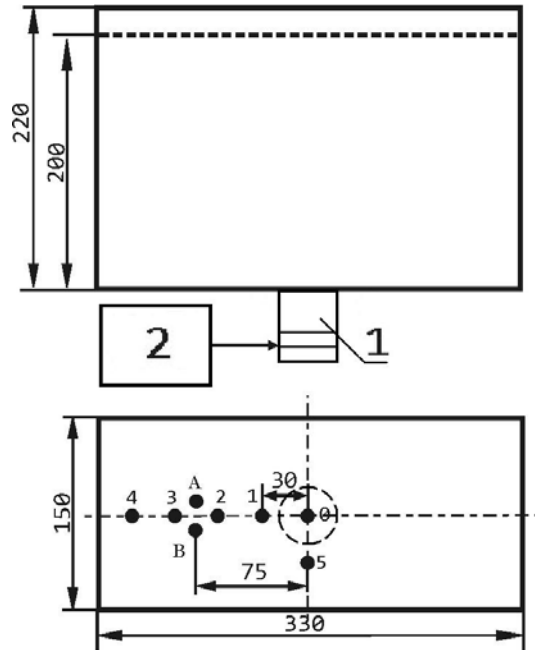


Рис. 3. Технологічна сміть з вказанням точок вимірювань (1-п'єзоелектричний перетворювач; 2-ультразвуковий генератор)

$$\bar{I}_a = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ia}}{n} = \frac{1}{n R K_a S_{\Gamma a}} \cdot \sum_{i=1}^n U_{ia}^2,$$

де \bar{I}_a - середнє значення інтенсивності коливань, I_{ia} - інтенсивність коливань в і-тій точці отримане гідрофоном (рис. 1а), n - кількість точок вимірювання, U_{ia} - діюче значення напруги на гідрофоні в і-тій точці, R - опір навантаження гідрофону, K_a - коефіцієнт, який враховує параметри п'єзокераміки та конструкції гідрофону (рис.1а).

Отже

$$\bar{I}_b \approx \bar{I}_a,$$

$$\frac{U_{\delta}^2}{RK_{\delta}S_{\Gamma\delta}} \approx \frac{1}{RK_aS_{\Gamma a}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}^2}{n} \quad (7)$$

Таблиця 2

Точка вимірювання	$\frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}}{\sqrt{n}}$, мВ	U_{δ} , мВ	$\frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}}{U_{\delta} \cdot \sqrt{n}} \approx \sqrt{\frac{K_a S_{\Gamma a}}{K_{\delta} S_{\Gamma \delta}}}$	Розбіжність даних, %
А	3479,1	56,8	61,2	0,51 %
В	3425,0	55,7	61,5	

Коефіцієнти K_a і K_{δ} , які визначають чутливість гідрофонів, невідомі для обох гідрофонів, а є вимірними тільки напруги на гідрофонах (рис.1а) і (рис.1б) відповідно U_a і U_{δ} . Отже для того, щоб підтвердити ідентичність вимірювань за допомогою обох типів гідрофонів було порівняно відношення усередненої по висоті технологічного об'єму напруги U_a до напруги U_{δ} в точках з близькою картиною поля А і В. Враховуючи (7) можна записати

$$\frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}^2}{U_{\delta}^2 \cdot n} \approx \frac{K_a S_{\Gamma a}}{K_{\delta} S_{\Gamma \delta}}, \quad \frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}}{U_{\delta} \cdot \sqrt{n}} \approx \sqrt{\frac{K_a S_{\Gamma a}}{K_{\delta} S_{\Gamma \delta}}} \quad (8)$$

Права частина виразу (8) є постійним коефіцієнтом і визначається лише параметрами гідрофонів. Тому в точках з близькою картиною поля А і В ця величина має бути однаковою (табл.2).

Також було проведено вимірювання за допомогою обох типів гідрофонів в точках 1-5 (рис.3) технологічної ємності, що знаходяться на різній відстані від випромінювача. Відстань між точками 30 мм. Очевидно, що картина поля в цих точках різна, що і підтверджують вимірювання за допомогою гідрофона (рис.1а). Зазначені результати вимірювання показані на рисунку 5.

По осі X відкладено глибину технологічної ємності, 0 відповідає її дну. Нульова точка вимірювання розташована над випромінювачем.

Результати вимірювань за допомогою гідрофона (рис.1а) в цих же точках та їх порівняння з попередніми

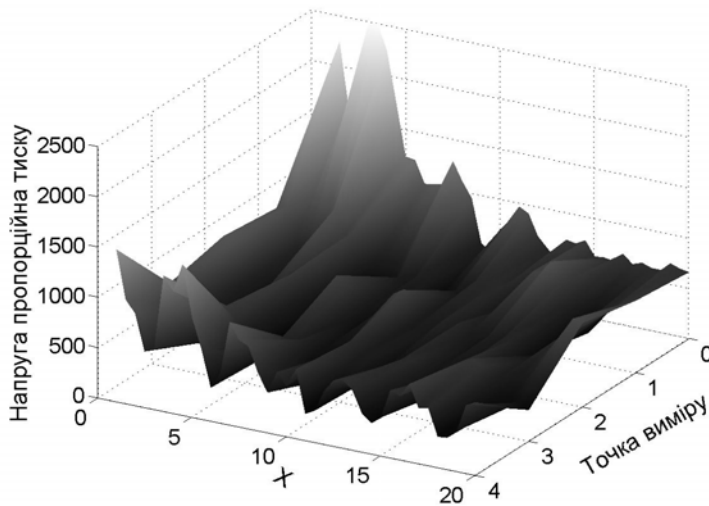


Рис. 5. Розподіл звукового тиску в технологічній ємності

(рис. 5) наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Точка вимірювання	0	1	2	3	4
Вимірювана величина					
$\frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}}{\sqrt{n}}$, мВ	6564,5	3484,4	3507,9	2975,7	4240,5
U_{δ} , мВ	74,7	41,5	35,7	36,2	42,7
$\frac{\sum_{i=1}^n U_{ia}}{U_{\delta} \cdot \sqrt{n}} \approx \sqrt{\frac{K_a S_{\Gamma a}}{K_{\delta} S_{\Gamma \delta}}}$	87,9	84,0	98,4	82,3	99,4
Середнє значення коефіцієнта	90,4				
Відхилення коефіцієнта від середнього значення, %	-2,8	-7,6	8,1	-9,8	9,1

Наявність відхилення між значеннями постійного коефіцієнта, розрахованого в різних дослідях, проведених в точках 0-4, пояснюється різною формою просторової діаграми направленості гідрофонів, яка не врахована в (1)-(8). Так гідрофон (рис.1а) має діаграму направленості близьку до форми кулі, а гідрофон (рис.1б) – близьку до форми циліндра з віссю, що збігається з віссю гідрофона.

Висновки Проведені дослідження підтвердили те, що потужність сигналу на виході гідрофонів типу (рис. 1б) прямопропорційна інтенсивності акустичних хвиль, яка, в свою чергу, є усередненим значенням інтенсивностей акустичних хвиль в точках вздовж осі гідрофону. Потужність сигналу на виході гідрофонів типу (рис. 1а) відповідає інтенсивності акустичних хвиль в тій локальній області, де розміщено гідрофон (рис. 1а).

Таким чином в технологічних ємностях, де акустичне поле однорідне і відсутні стоячі хвилі можливе використання обох типів гідрофонів. Проте гідрофон (рис. 1б) має обмежене застосування через відносно більші габаритні розміри. В технологічних ємностях, де акустичне поле неоднорідне і наявні стоячі хвилі варто застосовувати гідрофон (рис. 1б).

Список літератури

1. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд., перераб. и доп / А. Е. Колесников. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 248 с., ил.
2. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / М.Г. Сиротюк; [под ред. Л.Д. Розенберга]. – М.: Наука, 1968. – Ч. 5. – С. 168 – 220.
3. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: ИИЛ., 1957. – 723 с., ил.

УДК 621.865:519.872

Н.Р. Веселовська канд.техн.наук

НТУ України „Київський політехнічний інститут” м.Київ, Україна

ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ОБСЯГІВ НАКОПИЧУВАЧІВ АГРЕГАТНИХ ЗАСОБІВ В ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

В статье решается задача оптимизации емкостей накопителей агрегатных средств - оборудования гибких интегрированных производственных систем, позволяющая обеспечить заданное время выполнения процесса обработки деталей в системе с учетом произвольных характеристик производительности оборудования.

The article deals with the problem of optimizing storage capacity of aggregate assets - equipment of flexible integrated manufacturing systems, allowing the desired run-time processing of parts in the system, taking into account the performance characteristics of arbitrary equipment.

Вступ. Постановка задачі дослідження. В теперішній час характерною особливістю верстатобудування в промислово розвинутих країнах є випереджаючі темпи зростання виробництва, включаючи верстатні комплекси з ЧПК, обробляючі центри, гнучкі виробничі модулі, при одночасному зменшенні випуску верстатів з ручним керуванням, використання науково ємних, високопродуктивних верстатів в гнучких виробничих системах.

Металообробне обладнання є одним з головних чинників, що визначають розвиток народного господарства країни. Ефективність його використання безпосередньо впливає на виробництво нових машин для всіх галузей промисловості, сільськогосподарства тощо, а це характеризує рівень життя суспільства.

По мірі стабілізації економіки, а у подальшому безсумнівного зростання об'ємів машинобудування в нашій країні, з'явиться зростаючий попит на прецизійні, високоавтоматизовані верстати. Нове обладнання повинно володіти високою точністю, гнучкістю, продуктивністю та надійністю, мати сучасний дизайн, бути максимально безпечним та зручним при роботі та обслуговуванні, мати низький рівень шуму та вібрацій. Разом з тим, обладнання повинно мати низьку вартість, тому слід приймати всі міри щодо зменшення витрат на його виробництво, що вимагає проведення дослідницьких та діагностичних випробувань обладнання. При таких випробуваннях повинна бути перевірена результативність прийнятих рішень на протязі всього життєвого циклу верстату, вказані найбільш ефективні шляхи досягнення потрібного рівня якості, ефективності, надійності та оптимальності і дана гарантія того, що розроблена модель верстата після внесення відповідних виправлень може бути виготовлена.

Слід відмітити, що ці вимоги є протилежними за своєю сутністю і одним з найперспективніших шляхів розв'язання цього протиріччя є застосування гнучких виробничих систем (ГВС). Як показує світовий досвід, використання ГВС дозволяє за рахунок універсалізації обладнання, адаптації його до зміни продукції, що виробляється, швидкого і безболісного налаштування технологічних процесів, зменшити питомі витрати на виробництво одиниці продукції, що випускається.