

УДК 66.084.8

О.Ф. Луговський, д-р техн. наук,
 А.В. Мовчанюк, канд. техн. наук
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут»,
 І.М. Берник, канд. техн. наук
 Вінницький національний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ МАЛОАМПЛІТУДНОГО РЕЗОНАНСНОГО КАВІТАТОРА ПРИ ОБРОБЦІ РІДИННО-ДИСПЕРСНИХ СЕРЕДОВИЩ

Работа посвящена изучению конфигурации кавитационной области и интенсивности кавитационных процессов при обработке жидкодисперсной среды, с использованием акустического метода измерения, с помощью измерительных гидрофонов на основе пьезокерамики. Построены зависимости отнормированного звукового давления от расстояния к источнику ультразвука, а также рассмотрена диаграмма направленности и импеданс излучения малоамплитудного привода-преобразователя.

Work is sacred to the study of configuration of cavitation area and intensity of cavitation processes at treatment of liquid dispersion environment with the use of acoustic method of measuring, by means of measuring hydrophones on the basis of piezoceramic. Dependences of rationed of voice pressure are built on distance to the source to the ultrasound, and also the diagram of orientation and impedance of radiation of little-amplitude drive is considered.

Вступ

Розповсюдження потужних ультразвукових коливань у рідині супроводжується виникненням та розвитком акустичної кавітації. При цьому спостерігаються зміни акустичних параметрів рідини, яка озвучується, що впливає на параметри технологічного процесу [1]. За наявності кавітації та за рахунок зміни акустичних властивостей спостерігається викривлення акустичного поля. Таким чином, вивчення конфігурації акустичного поля дозволяє оптимізувати основні показники технологічного процесу, який відбувається під дією акустичної кавітації.

Вимірювання параметрів кавітаційної області можна здійснювати декількома методами: за дією кавітації на хімічні процеси у рідині [2]; за ерозійною дією акустичної кавітації [3]; за дією акустичної кавітації на біологічні об'єкти [4]; за характером та інтенсивністю акустичного шуму, що супроводжує кавітацію [5] та низки інших. При цьому методи вимірювання параметрів акустичного поля умовно розділяють на прямі та непрямі. До прямих методів можна віднести методи, за яких безпосередньо вимірюють параметри кавітаційних бульбашок, наприклад, тиск, що виникає при захопленні кавітаційної бульбашки. До непрямих методів можна віднести ті, за яких вивчається технологічна або фізична дія ультразвукової кавітації.

До найбільш перспективних методів вимірювання конфігурації кавітаційної області та інтенсивності кавітаційних процесів відноситься акустичний метод — за допомогою гідрофонів [6]. На виході гідрофона генерується величина електричної напруги (заряду), яка пропорційна величині звукового тиску. Взаємну відповідність між електричною напругою та звуковим тиском може бути встановлено стандартними методами взаємності.

Під час вимірювання малого звукового тиску в режимі слабзорозвиненої кавітації або в докавітаційному режимі можна отримати конфігурацію кавітаційної області при переміщенні гідрофона у технологічному об'ємі. Вимірювати величину електричної напруги пропорційно до звукового тиску можна за допомогою вольтметра змінної напруги. Аналізуючи спектральний склад сигналу гідрофона можна непрямо судити про інтенсивність кавітаційних процесів. Геометричні розміри гідрофона можуть бути зведені до мінімуму, що дозволяє зменшувати ступінь викривлення звукового поля при його використанні. Метод дозволяє досліджувати як форму звукового поля, так і давати оцінку інтенсивності кавітаційних процесів.

Звідси випливає, що вимірювання за допомогою гідрофона є найбільш перспективними. Вказаний метод вимірювання використовували як основний під час проведення експериментальних досліджень технологічного процесу ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з яблучних вичавок.

Метою роботи є дослідження конфігурації акустичного поля при обробці рідинно-дисперсного середовища за допомогою гідрофона.

Вимірювальне обладнання для дослідження параметрів акустичного поля

Основною характеристикою звукового поля в технологічному середовищі є величина звукового тиску та його розподіл в об'ємі технологічної рідини. Величина звукового тиску пов'язана з інтенсивністю кавітаційних процесів, які відбуваються в технологічному середовищі, а конфігурація звукового поля визначає конфігурацію каві-

таційної області. Зважаючи на це, дослідження параметрів ультразвукового поля і кавітаційної області може бути зведене до вивчення розподілу звукового тиску в технологічному об'ємі досліджуваного обладнання.

Вимірювання величини звукового тиску, може бути здійснено за допомогою вимірювальних гідрофонів на основі п'єзокераміки. Під час роботи в режимі приймання на обкладинках п'єзоелемента гідрофона з'являється різниця потенціалів, величина якої пропорційна звуковому тиску. Калібрування гідрофонів може здійснюватися різними методами, наприклад, стандартним методом взаємності [6]. Зокрема, для використаного у вимірах гідрофона (рис. 1) чутливість становила

$$M = 7,9 \cdot 10^{-5} \frac{В}{Па}$$



Рис. 1. Вимірювальний гідрофон на основі п'єзокераміки.

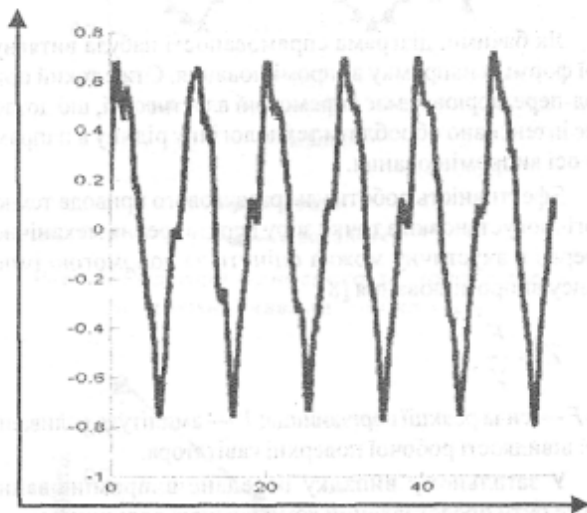


Рис. 2. Форма напруги на гідрофоні при виникненні кавітації.

Слід зазначити, що вимірювання величини електричної напруги, пропорційної звуковому тиску, може бути здійснено різними способами, а саме: вольтметром пікового значення, вольтметром середнього значення та вольтметром середньоквадратичного значення. При цьому вимір різними способами призведе до різних результатів.

Це пов'язано з тим, що при появі кавітаційних явищ, форма електричної напруги на гідрофоні буде істотно відрізнятися від гармонійної (рис. 2). Тому вимірювання доцільно здійснювати вольтметром середньоквадратичних значень ВЗ-57. При цьому вимірювана напруга буде пропорційна не тільки звуковому тиску, а й інтенсивності ультразвукових коливань.

Дослідження згасання ультразвуку в технологічній суміші

Поширення ультразвуку в рідині супроводжується поглинанням енергії у технологічному об'ємі, що призводить до зниження амплітудного значення звукового тиску при віддаленні від джерела ультразвукових коливань. Найчастіше [1] оцінюють не зменшення амплітуди звукового тиску, а зміну інтенсивності ультразвукових коливань

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-2\alpha x}$$

де $I(x)$ — інтенсивність ультразвукових коливань у точці з координатою x ; $I(0)$ — інтенсивність ультразвукових коливань на початку координат; α — коефіцієнт згасання ультразвуку.

Отже, коефіцієнт згасання ультразвуку може бути розрахований за результатами вимірів

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

де x_2 і x_1 — координати точок вимірів; I_1 і I_2 — інтенсивності ультразвукових коливань у відповідних точках вимірів.

Інтенсивність ультразвукових коливань пов'язана з амплітудою звукового тиску співвідношенням

$$I = \frac{P^2}{2 \cdot \rho \cdot c}$$

де P — амплітуда звукового тиску; ρ — густина; c — швидкість звуку.

Зважаючи, що зміна щільності та швидкості звуку мало залежать від величини звукового тиску (що справедливо для докавітаційного режиму роботи і режиму слабо розвиненої кавітації), можемо записати

$$\alpha \approx \frac{1}{2 \cdot (x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2$$

звідки

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Переходячи від значень звукових тисків до напруги на затискачах гідрофона, отримаємо

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \cdot \ln \left(\frac{U_1}{U_2} \right)$$

де U_1 і U_2 — напруга на затискачах гідрофона в точках вимірів.

У результаті експериментальних досліджень обробки рідино-дисперсного середовища, представленого неоднорідною системою «вода — яблучні вичавки» [7], було встановлено, що величина загасання ультразвуку становить $2,3 \text{ см}^{-1}$. При цьому загасання практично не залежить від концентрації вичавок у технологічній суміші і робочої частоти ультразвукової апаратури.

При цьому, виходячи із залежності амплітудного значення звукового тиску на осі ультразвукового перетворювача

$$P(x) = P(0) \cdot e^{-\alpha x},$$

можна побудувати зміну безрозмірного віднормованого тиску $\bar{P}(x)$ від координати точки вимірювань (рис. 3)

$$\bar{P}(x) = \frac{P(x)}{P(0)} = e^{-\alpha x}$$

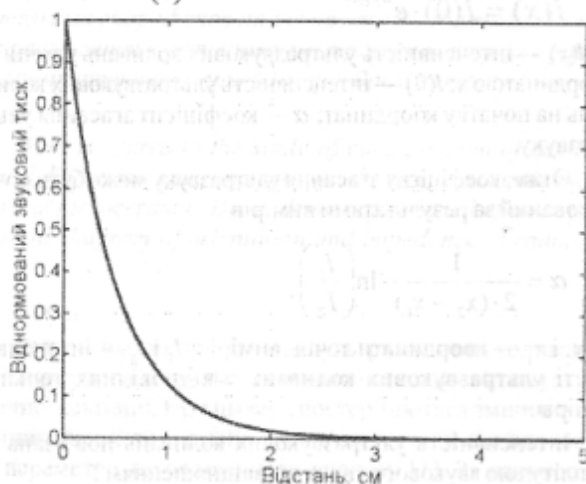


Рис. 3. Залежність віднормованого звукового тиску від відстані до джерела ультразвуку.

Як видно з отриманої залежності, найбільш істотна зміна звукового тиску спостерігається на відстані не більше 10 мм від випромінюючої поверхні, яка становить величину 20 дБ. Потім зміна форми звукового поля від відстані вже не є суттєвою. Отже, результати вимірювань у технологічній рідині з вичавками і без вичавок відрізнятимуться на величину того ж порядку.

Ультразвуковий перетворювач технологічного призначення можна охарактеризувати різними параметрами. Розподіл звукового тиску і фронту акустичної хвилі у просторі можна охарактеризувати за допомогою діаграми спрямованості [8]. При цьому ультразвуковий перетворювач можна розглядати як поршень, що встановлено у нескінченному екрані. Тоді діаграма спрямованості поршня в полярних координатах може бути розрахована для потенціалу швидкості

$$\Psi(\theta) = \frac{2 \cdot J_1(k \cdot a \cdot \sin(\theta))}{k \cdot a \cdot \sin(\theta)}, \quad (1)$$

де J_1 — функція Бесселя; k — хвильове число; a — радіус поршня; θ — полярний кут.

У зв'язку з тим, що потенціал швидкості та амплітуда звукового тиску пов'язані, отримуємо залежність

$$P = \rho \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} + const,$$

де ρ — щільність рідини.

За діаграмою спрямованості можна судити про форму фронту розповсюдження акустичної хвилі.

Ультразвуковий малоамплітудний кавітатор кріпиться на стінку або днище технологічної ємності. Робоча частота привода 44 кГц, діаметр випромінювача 50 мм. Розглянемо діаграму спрямованості такого привода-перетворювача (рис. 4), розраховану у відповідності з рівнянням (1).

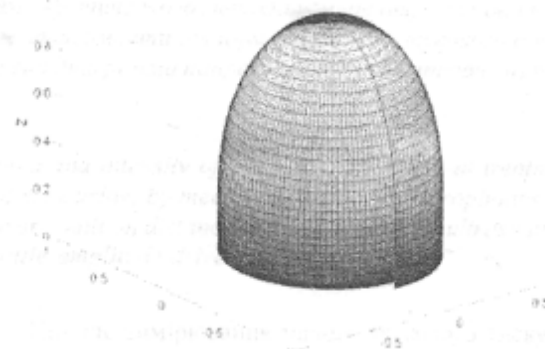


Рис. 4. Діаграма спрямованості малоамплітудного кавітатора.

Як бачимо, діаграма спрямованості набула витягнутої форми у напрямку випромінювання. Отже такий привод-перетворювач має спрямовані властивості, що дозволяє інтенсивно обробляти технологічну рідину в напрямку осі випромінювання.

Ефективність роботи ультразвукового привода технологічної установки з точки зору перетворення механічної енергії в акустичну можна оцінити за допомогою імпедансу випромінювання [8]:

$$Z = \frac{F}{V},$$

де F — сила реакції середовища; V — амплітуда коливної швидкості робочої поверхні кавітатора.

У загальному випадку імпеданс випромінювання може бути представлений комплексною величиною:

$$Z = \rho \cdot c \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot J_1(2 \cdot k \cdot a)}{2 \cdot k \cdot a} + j \cdot \frac{2 \cdot S_1(2 \cdot k \cdot a)}{2 \cdot k \cdot a} \right),$$

де S_1 — функція Струве.

При цьому активна частина імпедансу показує частину енергії, що передається в дальню зону перетворювача, а реактивна складова відображає енергію, що витрачається на коливання приєднаної маси рідини.

Розглянемо значення опору випромінювання такого привода кавітатора (рис. 5).

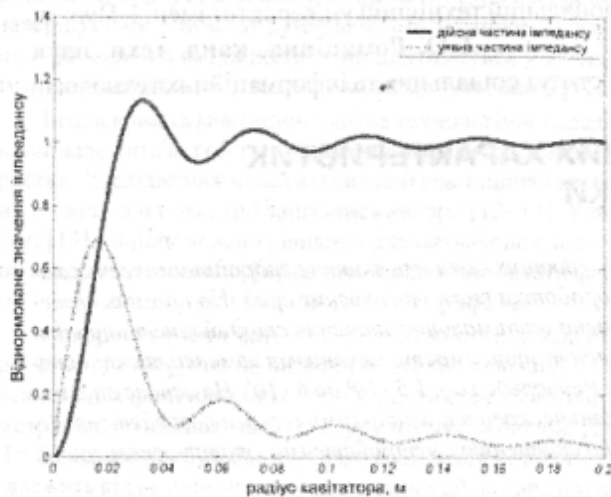


Рис. 5. Імпеданс випромінювання малоамплітудного привода-перетворювача.

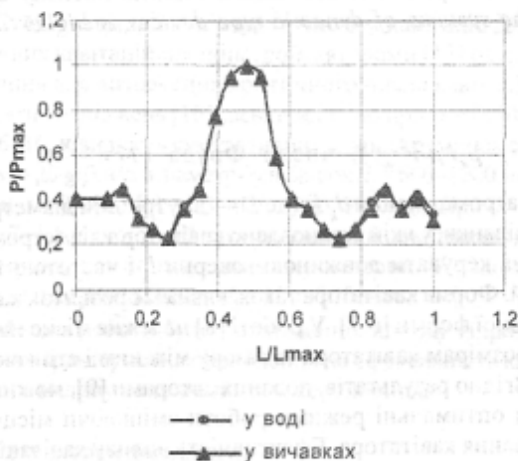


Рис. 6. Розподіл відносного звукового тиску по довжині кавітаційної камери.

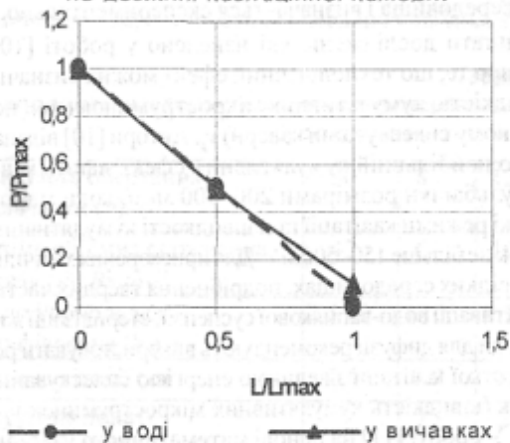


Рис. 7. Розподіл відносного звукового тиску по глибині кавітаційної камери в напрямі протилежному випромінюючій поверхні.

Як бачимо з отриманих значень, для малоамплітудного кавітатора спостерігається значне перевищення активної складової імпедансу над реактивною, отже, на утворення ультразвукової кавітації витрачається значна частина енергії ультразвукового поля.

Експериментальне дослідження розподілу звукового тиску для малоамплітудного кавітатора (рис. 6 та 7) підтверджує отримані теоретичні висновки [7].

Висновки

Таким чином для оптимізації технологічних процесів, які відбуваються при використанні ультразвукових кавітаційних технологій, доцільно досліджувати конфігурацію акустичного поля за допомогою гідрофонів. Для визначення пропорційної напруги звуковому тиску та інтенсивності ультразвукових коливань слід використовувати вольтметри середньоквадратичних значень.

Теоретична залежність віднормованого звукового тиску від відстані до джерела ультразвуку показує значні зміни на відстані до 10 мм.

Обробку рідинно-дисперсного середовища малоамплітудними приводами-випромінювачами доцільно проводити у напрямку випромінювання. Переважна частина енергії ультразвуку в малоамплітудному резонансному кавітаторі витрачається на кавітаційні процеси.

Література

1. Розенберг, Л.Д. Об излучении звука в жидкость при наличии кавитации // Акустический журнал. — 1960. — Том IV. — Вып. 4. — С. 478—481.
2. Маргулис, М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): Учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1984. — 272 с.
3. Основы физики и техники ультразвука: Учебн. пособие для вузов / Б.А. Агранат, Б.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. — М.: Высшая школа, 1987. — 352 с.: ил., табл.
4. Эльпинер, И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. — М.: Физматгиз, 1969. — 420 с.
5. Лямшев, Л.М. К теории гидродинамического кавитационного шума // Акустический журнал. — 1969. — Том XV. — Вып. 4. — С. 572—578.
6. Колесников, А.Е. Ультразвуковые измерения. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд.-во стандартов, 1982. — 248 с.
7. Берник, І.М. Дослідження параметрів ультразвукового поля в технологічному процесі кавітаційного гідролізу-екстракції пектину // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. — 2009. — №57. — С. 82—87.
8. Свердлин, Г.М. Прикладная гидроакустика: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1990. — 320 с.: ил.

Надійшла 06.09.2010 р.