



УДК 550.3

*І.М. Берник, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КАВІТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

АНОТАЦІЯ. Розроблено аналітичні моделі системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище». Такий підхід дає можливість визначити тиск в контактній зоні, встановити закономірність його зміни в середовищі а також розробити пропозиції щодо вдосконалення технології обробки технологічних середовищ.

Ключові слова: кавітація, технологічне середовище.

ANNOTATION. The analytical models of system «cavitation machine – technological environment» were worked out. It has a possibility to determine contact zone pressure, to establish its regularity in the environment and also to make proposals to improve technology of work environment processing.

Key words: cavitation, technological environment.

Актуальність теми. Явище кавітації, що виникає при дії акустичного апарату на технологічне середовище широко застосовується для прискорення різних технологічних процесів (диспергування, екстрагування, перемішування та ін.) в хімічній, харчовій, будівельній та інших галузях народного господарства. Тому цей вид обробки та шляхи інтенсифікації різного роду технологічних процесів викликають пильну цікавість вчених і інженерів.

Процес кавітації обумовлений різкою змінною характеристик поля швидкостей і тисків порожнин технологічного середовища (вода, суспензія, емульсія та ін. рідинні середовища), а утворення кавітаційних бульбашок відбувається при локальному падінні тиску нижче деякого критичного значення, яке відповідає порогу кавітації. Отже, ключовим параметром зародження та розвитку кавітації є тиск, який істотно залежить від фізичного стану рідини. Існує низка робіт [1-7] присвячених визначенню природи та числових значень тисків в різних частинах утвореної кавітаційної бульбашки та співвідношення числових значень тисків, за яких відбувається захоплення бульбашки.

В даній роботі висувається наукова ідея за якою процес зародження і розвитку кавітаційної області залежить від умов взаємодії контактної зони системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки з розглядом моделі середовища, як системи з розподіленими параметрами. Такий підхід дає можливість розкрити фізичну сутність взаємодії в контактній зоні, визначити тиск в цій зоні, встановити закономірність його зміни в середовищі, а також розробити пропозиції щодо вдосконалення технології обробки технологічних середовищ. Важливість врахування амплітуди акустичного тиску відмічається і в роботах [2,5].

Аналіз досліджень. Цілком очевидно, що реалізація запропонованої ідеї потребує розгляду фізичної та математичної моделі кавітуючого середовища, яке представляється у вигляді бульбашок. Кавітуюче середовище у відповідності до співвідношення межі текучості τ при чистому зсуві і атмосферному тиску P_a може бути

$$\begin{aligned} \tau/P_a \geq 1 & - \text{твердопластичним} \\ \tau/P_a = 1 & - \text{рідиннопластичним} \\ \tau/P_a \leq 1 & - \text{рідинним} \end{aligned} \quad (1)$$

Врахування хвильових явищ в кавітуючому середовищі можна оцінити за співвідношенням часу розповсюдження хвиль $t_{\text{хв}}$ і періоду коливань T .

$$\begin{cases} \tau < T; \\ \tau > T. \end{cases} \quad (2)$$

За умови:

За першої умови (2) процес коливання середовища можна вважати повільним і знехтувати пружною хвилею. Тобто в такому випадку прискорення і деформації визначаються включно силами. Оскільки $\tau = l/c$, де l - характерний розмір середовища в напрямку якого здійснюється прикладання сил, а $c^2 = E/\rho$, де E - модуль, ρ - щільність середовища, то характеристики опору середовища діями зовнішніх сил визначаються інерційними властивостями.

При виконанні другої умови (2) рух середовища визначається пружними хвилями.

В більшості реальних дій кавітаційні середовища знаходяться між критеріями залежностей (2), тобто, як правило, необхідно враховувати і пружні і інерційні властивості. Варто відмітити, що залежності (2) не враховують дисипативні властивості, оскільки їх вплив є суттєвим в області резонансу, як режиму, що найбільш застосовується для обробки технологічних середовищ.

Синтезуючи результати досліджень [1-6] можна визначити, що в основному рівняння статичної рівноваги бульбашки, що має сферичну форму (рис. 1) без урахування сил в'язкого тертя [2]:

$$p = p_n + p_r - \frac{2\sigma}{R}, \quad (3)$$

де p - зовнішній тиск в оточені бульбашки; p_n - тиск насичених парів рідини; p_r - парціальний тиск газу; σ - коефіцієнт поверхневого натягу; R - радіус бульбашки.

Тиск p_n і коефіцієнт σ залежать від температури.

Так, наприклад, для води при температурі $t=20^\circ\text{C}$ $p_n=2,35 \cdot 10^3$ Па, $\sigma=7,35 \cdot 10^{-2}$ н/м, а при $t=4^\circ\text{C}$ $p_n=0,78 \cdot 10^3$ Па [5].

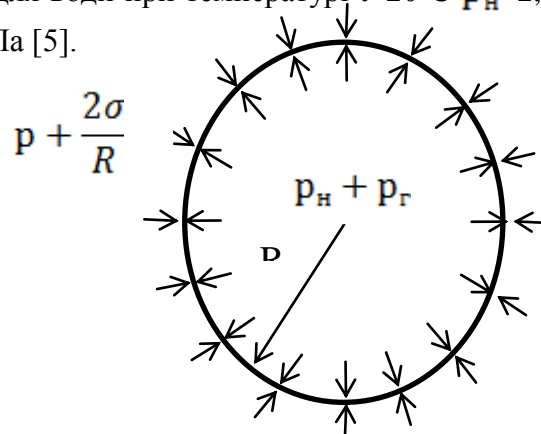


Рисунок 1. Діючі сили в парогазовій бульбашці.

Із газодинаміки слідує, що тиск зв'язаний із об'ємом і температурою рівнянням Клайперона:

$$p_r = VT/R^3, \quad (4)$$

Де T - абсолютна температура; V - постійна, що залежить від маси газу в середині бульбашки.

Підстановкою (4) в (3) можна отримати рівняння рівноваги, яке враховує вплив температури. Недолік цих рівнянь полягає у тому, що не враховані сили в'язкості, дифузію газу через поверхню бульбашки, стискуваність, інерцію. Важливим аспектом є визначення процесу зміни радіуса бульбашки, що потребує уточнення рівняння (3). Є і інші допущення. Так за умовою, що процес розширення або стиснення бульбашки є ізотермічним, зміна тиску газу і радіуса бульбашки приймається законом Бойля-Маріота [5].

Використовуючи закон, за яким $p_r R^3 = p_{r0} R_0^3$ (індекс «0» відповідає початковому стану бульбашки) рівняння (3) може бути трансформовано до виду, де враховано зміну радіусу бульбашки:



$$p = p_n + \left(p_0 + p_n + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \frac{R_0^3}{R^3} - \frac{2\sigma}{R} \quad (5)$$

Власне рівняння (5) хоча і дає можливість розрахувати значення шуканих параметрів, має теж недоліки.

Існує і підхід [3], за яким закон зміни стану газу в бульбашці приймається адіабатичним, а за яким приймається умова, що бульбашка має велику кількість газу і рух її стінок відбувається так швидко, що розсіяння тепла в рідині розглядається як повільно розвиваючийся процес:

$$p = p_{г0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R}, \quad (6)$$

де γ – показник адіабати.

Необхідно зауважити, що загальне рівняння задачі руху бульбашки є надто складним, оскільки крім чіткого визначення умови руху контактної зони «апарат – середовище» виникає задача розгляду ще однієї системи «рідина – бульбашка», яка утворює дві окремі частини: рідина з розчиненим газом – водні бульбашки і суміш газу і пари рідини – в середині бульбашки. Очевидно, що в такому випадку для визначення руху кавітаційної області варто використати закони газо- і термодинаміки, за якими складається система рівнянь, яка включає рівняння: нерозривності, балансу енергії, дифузії, рух частинок рідини і газу, теплопровідності, а також граничні умови. Згадані рівняння хоча і громіздкі, але застосування для розгляду лінійного процесу при рішенні особливих складнощів не представляють.

В цілому можна констатувати, що сам процес зародження та розвиток кавітаційних процесів для певних умов їх протікання дозволяє визначити основні параметри.

Так, в роботі [1] пропонується формула для визначення безрозмірного мінімального радіуса R_{min} бульбашки:

$$R_{min}/R_{max} = \frac{3\delta}{1+3\delta-\delta^{1.6}}, \quad (7)$$

де R_{max} – максимальний радіус; $\delta = p_{пг}/p_0$ ($p_{пг}$ – тиск в середині бульбашки, який складається із парціального тиску пари $p_{п}$ і газу $p_{г}$); p_0 – гідростатичний тиск.

За умови, що $\delta \gg 1$ [1] залежність (7) спрощується:

$$R_{min}/R_{max} = 3\delta \quad (8)$$

Середні за період значення щільності ρ_k і стиснення β_k визначаються:

$$\rho_k = \rho_p(1 - \kappa_k) + \rho_g \kappa_k; \quad \beta_k = \beta_p(1 - \kappa_k) + \beta_g \kappa_k, \quad (9)$$

де ρ_p, ρ_g – щільність рідини і газу відповідно;

κ_k – коефіцієнт кавітації [2]:

$$\kappa_k = \Delta V/V, \quad (10)$$

де ΔV – об'єм кавітаційних бульбашок; V – об'єм рідини.

Параметр ΔV визначається середнім розміром кавітаційних бульбашок і їх кількістю. Оскільки розмір і кількість бульбашок в період кавітаційного процесу змінюються, застосування формули (10) вельми утруднено.

Методика і результати досліджень. Методикою дослідження є формулювання умов взаємодії кавітаційного апарату і технологічного середовища і визначення на цій основі параметрів кавітаційного процесу.

Розрахункова схема «кавітаційний апарат – технологічне середовище» представляється дискретно-континуальною моделлю з частотно-залежним розсіянням енергії (рис. 2).

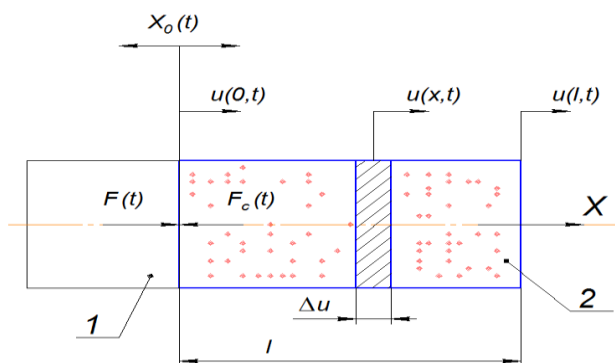


Рисунок 2. Розрахункова схема системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище».

Хвильове рівняння середовища, з урахуванням за гіпотезою в'язкого тертя:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{4\eta\partial}{3\rho\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right), \quad (11)$$

де u - переміщення шару середовища; x - координата; c - швидкість розповсюдження хвиль; η - коефіцієнт в'язкості; ρ - щільність.

Для випадку гармонійних коливань:

$$u = u(x) \sin(\omega t). \quad (12)$$

Підстановка виразу (12) у (11) дає диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, рішення якого має вигляд:

$$u(x) = (A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)), \quad (13)$$

де \bar{K} – комплексна постійна розповсюдження хвилі, котра з урахуванням впливу в'язкого тертя приблизно визначається:

$$\bar{K} = k - i\beta = \frac{\omega}{c} - i \left(\frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^3} \right). \quad (14)$$

Тоді вираз для переміщення шару середовища буде мати вигляд:

$$u = [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \sin(\omega t). \quad (15)$$

Диференціюючи вираз (15) по часу, отримуємо вираз для коливальної швидкості:

$$v = \omega [A \cos(\bar{K}x) + B \sin(\bar{K}x)] \cos(\omega t). \quad (16)$$

Після диференціювання виразу (16) по часу, отримуємо вираз для визначення прискорення. Інтеграл від прискорення по координаті з урахуванням другого закону І. Ньютона буде дорівнювати тиску звукової хвилі:

$$P(x) = -\frac{\rho\omega^2}{\bar{K}} [A \sin(\bar{K}x) - B \cos(\bar{K}x)]. \quad (17)$$

Так як в цьому випадку має місце стояча звукова хвиля, то можна виключити із розгляду член, що залежить від часу. Постійне інтегрування визначаємо із початкових і кінцевих умов розповсюдження хвилі в шарі рідини (див. рис. 2). У якості початкової умови зручно використовувати значення коливальної швидкості на випромінюваній поверхні ультразвукового перетворювача. Прийемо межу розподілу перетворювач – шар рідини за початок відліку, тобто $x = 0$ і, таким чином, $v = v_0$. При $x = l$ має місце межа розподілу рідина – газ, на якій згідно з прийнятими допущеннями коефіцієнт відбиття хвилі дорівнює одиниці, і так як $\rho c \gg \rho_{\text{впл}} c_{\text{впл}}$, то маємо на межі вузол звукового тиску, тобто при $x = l, p(x) = 0$.

Підставляючи отримані граничні умови в рівняння (16) і (17), отримуємо вирази для постійного інтегрування:

$$A = \frac{v_0}{\omega}; \quad B = \frac{v_0 \sin(lx)}{\omega \cos(lx)}. \quad (18)$$



Підставляючи отримані граничні умови в рівняння (17), отримуємо вираз для звукового тиску в шарі середовища в залежності від товщини шару:

$$p(x) = \frac{v_0 \rho \omega \sin(K(l-x))}{K \cos(\bar{K}l)}. \quad (19)$$

Практичний інтерес представляє розвиток кавітації в шарі, який безпосередньо межує з поверхнею ультразвукового апарату ($x = 0$):

$$P = \frac{v_0 \rho v}{K} \operatorname{tg} \bar{K}l, \quad (20)$$

або з урахуванням (17):

$$P = v_0 \rho c K_{\text{ХВ}}, \quad (21)$$

$$\text{де } K_{\text{ХВ}} = \sqrt{\frac{[\sin kl \operatorname{ch} \beta l]^2 - [\cos kl \operatorname{sh} \beta l]^2}{(k^2 + \beta^2)[(\cos kl \operatorname{ch} \beta l)^2 + (\sin kl \operatorname{sh} \beta l)^2]}} \quad (22)$$

Отриманого вираз дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин.

Важливим параметром, що входить в залежність (21) є швидкість розповсюдження хвиль (c).

Коефіцієнт $K_{\text{ХВ}}$ враховує вплив хвильових процесів, що мають місце в середовищі при її коливаннях. Знаходження коефіцієнта $K_{\text{ХВ}}$, як і оцінка контактного тиску потребують експериментальних значень параметрів ρ, c, β, l , що є задачею подальших досліджень.

Цікавим параметром кавітаційного процесу є час кінцевої стадії захоплення бульбашки [5]:

$$\tau_0 = 1,7 R_{\min} / \sqrt{p_m / \rho}. \quad (23)$$

де R_{\min} – мінімальний радіус бульбашки; p_m – тиск; ρ – щільність.

Висновки

1. Складені рівняння руху і їх вирішенням за граничних умов взаємодії апарату і технологічного середовища отримані аналітичні залежності для визначення тиску, як в контактній зоні, так і в інших частинах технологічного середовища у напрямку розповсюдження хвиль
2. Аналізом отриманих залежностей з'ясовано, що визначними параметрами тиску є хвильовий опір, частота, амплітуда коливань, коефіцієнт дисипативного опору, співвідношення довжини хвилі до розміру технологічного середовища в напрямку віброакустичної дії.
3. З'ясовано, що середня за період щільність (складова хвильового опору) повною мірою залежить від середнього за період індексу кавітації, як і стискуваність технологічного середовища.

Література

1. Агрант Б.А. Влияние статического давления на акустические свойства кавитирующей жидкости / Б.А. Агрант, В.И. Башкиров // Акуст. журн. 1969. Т. 15, вып. 4. С. 605-607.
2. Акуличев В.А. Пульсации кавитационных пузырьков / В.А. Акуличев // Физика и техника мощного ультразвука: Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. Т.2. С. 129-166.
3. Казанцев В.Ф. Движение газовых пузырьков в жидкости под действием сил Бьеркнеса, возникающих в акустическом поле / В.Ф. Казанцев // Докм АН СССР. 1959. Т. 129. №1. С. 3-17.
4. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд // М., Л.: ГИТТЛ, 1951. – 107с.
5. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Киевський університет, 2007. – 245с.
6. Розенберг Л.Д. Об излучении звука в жидкость при наличии кавитации / Л.Д. Розенберг, М.Г. Сиротюк // Акуст. журн. 1960. Т. 6, вып. 4. С. 478-481.
7. Grum J.A. Sonoluminescence produced by "stable" cavitation / J.A. Grum // Ibid., 1985. Vol. 78. №1. P. 137-139.