**Берник І. М.***Вінницький
національний
аграрний
університет***Луговський О. Ф.***Національний
технічний
університет
України "Київський
політехнічний
інститут"***Bernyk I. M.***Vinnitsia National
Agrarian University***Lugovskoy O. F.***National Technical
University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic
Institute"***УДК 621.031:664.292****ВСТАНОВЛЕННЯ ОСНОВНИХ
ПАРАМЕТРІВ ВПЛИВУ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО
СЕРЕДОВИЩА НА РОБОЧИЙ
ПРОЦЕС УЛЬТРАЗВУКОВОЇ
КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ**

Визначено структурний та феноменологічний підходи до встановлення напружено-деформованого стану кавітаційної обробки технологічних середовищ. Розглянуто фізико-математичні моделі оброблюваних середовищ з частотнозалежними та частотнонезалежними законами зміни дисипативних властивостей. Отримані аналітичні залежності та виявленні закономірності зміни в шарах технологічного середовища динамічного тиску, які є одними з головних параметрів впливу на утворення та встановлення кавітаційного поля.

Виведені залежності динамічного тиску є теоретичною базою для визначення раціональних параметрів ефективної обробки технологічних середовищ при використанні ультразвукових кавітаційних технологій.

Ключові слова: ультразвукова кавітація, динамічний тиск, кавітаційне поле, технологічне середовище.

Постанова проблеми. Основними реологічними властивостями будь-якого технологічного середовища являються пружні, в'язкі та пластичні, які в умовах кавітаційної обробки ультразвуковими апаратами (УЗА) суттєво впливають на визначення параметрів УЗА та інтенсифікацію протікання технологічного процесу.

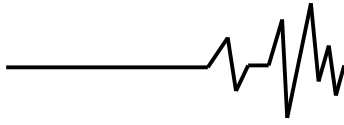
Очевидно, що при реалізації різних ультразвукових технологічних процесів (УЗТП) згадані властивості середовища, являються тим навантаженням, яке діє, на ультразвукову коливальну систему. Тоді при заданому значенні акустичної потужності апарата на вході перетворювача необхідна амплітуда коливань повинна визначатися опором навантаження.

Випромінювач є частиною коливальної системи, призначений для випромінювання ультразвукових коливань (УЗК) в технологічне середовище, де використовується безпосередньо опір навантаження. Отже, визначається значенням приведенного опору навантаження з урахуванням коефіцієнта трансформації хвильової системи. Тому визначення опору середовища, який реально

відображає взаємодію його з УЗА є задачею актуальною.

Аналіз досліджень. Існуючі способи визначення опору технологічного середовища відрізняються між собою прийнятою моделлю середовища – у вигляді дискретного [1], або континуального [2–4]. В будь-якому випадку при коливаннях незалежно від форми і частоти коливань опір технологічного середовища складається із пружних, в'язких та пластичних властивостей. Інерційно-пружні складові визначають так званий реактивний опір, а дисипативна складова – активний [5]. Цей загальний опір прийнято називати механічним імпедансом коливальної системи, який є комплексним коефіцієнтом опору і представляє собою відношення сили F , що прикладена до будь-якої точки системи, до коливальної швидкості v в цій же точці. Імпеданс є комплексною величиною, активна частина якого z_a пов'язана з дисипативними втратами в коливальній системі, реактивна частина z_p – з процесами періодичного обміну кінетичної енергії руху з потенційною енергією деформування тіла:

$$z = z_p + iz_a, \quad (1)$$



де i – уявна одиниця, що вказує поворот z_a відносно z_p на кут $\pi/2$.

При резонансі коливальної системи відбувається взаємна компенсація зведених мас і пружностей, в силу чого реактивний опір системи становиться рівним нулеві, в результаті модуль імпедансу приймає мінімальне значення.

Зміна реактивної складової навантаження середовища z_p призводить до зміни резонансної частоти ультразвукової коливальної системи, активна складова z_a визначає активні втрати в оброблювальному середовищі (в тому числі і корисну роботу) і пов'язана із зниженням амплітуди коливальної швидкості.

Кавітаційні процеси, характерні при випромінюванні в технологічне середовище, визначають тимчасовий характер сили і швидкості на поверхні випромінювача. Однак, напруження і зміщення у самому перетворювачі при роботі його у вказаних режимах зазвичай залишаються близькими до гармонічних, що дозволяє користуватися усередненими за період значеннями опору навантаження. В цьому випадку опір навантаженню (відношення його активної і реактивної складових) залежить від амплітуди коливань та параметрів технологічного процесу.

Зокрема, при обробці рідних середовищ z_p залежить від акустичних властивостей середовищ, режиму роботи (до кавітаційний режим, режим зародження кавітації, режим розвинутої кавітації), статичного тиску.

У більшості випадків, розміри окремих пухирців і їх скупчення виявляються набагато менше довжини хвилі первинного звукового поля. Це дозволяє розглядати рідину разом із газовими краплями, як деяке нове середовище з еквівалентними акустичними характеристиками, що відрізняються від акустичних характеристик крапельної рідини.

Мета роботи. Мета роботи полягає у виборі моделі технологічного середовища та визначення на цій основі напруження та динамічного тиску, саме від яких залежить протікання процесу кавітації.

Методика і результати досліджень. Існує два способи моделювання технологічного середовища: на основі феноменологічної моделі і структурної моделі. У феноменологічному підході при побудові структурної моделі описуються механізми, а в структурній моделі у формалізованому вигляді: поведінка елементарного об'єму середовища

відображається роботою пакета піделементів (ПЕ) з відмінними реологічними властивостями. ПЕ вважаються ідеально в'язкими, тобто їх непружна деформація змінюється зі швидкістю, що залежить від напруження ПЕ.

Найпростіший шлях до моделювання двофазних середовищ – введення двох груп непружних ПЕ, в кожній з яких реологічні функції подібні між собою, але не подібні до функцій в іншій групі. Базова структурна модель являє собою пакет ідеально в'язких піделементів (ПЕ), що зазнають однакові температурні дії і однакову історію деформування, але володіють відмінними реологічними властивостями і, відповідно, мають різні історії напруження (пружних деформацій $\varepsilon_{n,d}$ і непружних деформацій

$\varepsilon_{n,d}$). Напруження елемента об'єму матеріалу σ гіпотетично визначається як середнє по піделементам:

$$\sigma = \langle \sigma_n \rangle \sum_{k=1}^n \sigma_n q_e, \quad (2)$$

де σ_n – напруження піделементів; q – постійні «ваги» елементів; n – число піделементів.

Деформації елемента ε і піделементу ε_n визначається виразами:

$$\varepsilon = \varepsilon_k = \varepsilon_{n,d} + \varepsilon_{n,d}; \quad (3)$$

$$r_k = \frac{\sigma_k}{E}, \quad (4)$$

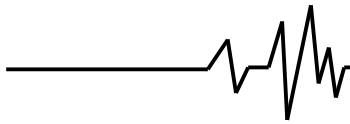
де E – модуль пружності матеріалу.

$$V_n = \Phi \left(\frac{\varepsilon_{n,d}}{K_m}, T \right), \quad (5)$$

де V_n – швидкість непружної деформації піделементів; T – температура; $\Phi(x, T)$ – реологічна функція; K_m – коефіцієнт «міцності» (константа ПЕ).

Значення коефіцієнта K_m визначаються деякою функцією розподілу $y(z_k)$. З подібності реологічних функцій (5) випливає подібність діаграм деформування піделементів і подібність діаграм деформування матеріалу при різних значеннях швидкості $\dot{\varepsilon}$ і температури T (принцип подібності).

Найпростіший шлях для двофазного середовища – це припущення про паралельне деформування двох моделей, властивості яких



не подібні. При ізотермічному навантаженні отримаємо вирази:

$$\varepsilon = \varepsilon'_\kappa = \varepsilon''_I, \quad \kappa = 1, \dots, n', \quad I = 1, \dots, n'', \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= G' \sigma' + G'' \sigma'', \\ \langle \sigma_i^j \rangle &= \sum_{i=1}^n \sigma_i^j g_i^j, \\ j &= I, II \\ i &= k, I, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^j &= \varepsilon_{n.d.} + \varepsilon_{n.d.}, \\ \varepsilon_{n.d.} &= A^j \Phi^j \left(\frac{\varepsilon_{n.d.}}{z_i} \right), \\ \varepsilon_{n.d.} &= \frac{\sigma_i^j}{E_j}, \end{aligned} \quad (8)$$

Тут римськими цифрами позначені номери фаз, G^j - відносна «вага» фаз.

Розглянемо найбільш контрастну ситуацію, коли перша фаза є пружно-пластичною, друга – в'язкою. Діаграма деформування матеріалу $\sigma(\varepsilon)$ як впливає з виразу (7), являє суму діаграм фаз $\sigma^I(\varepsilon)$ і $\sigma^{II}(\varepsilon)$ (з «вагами» G^j). Діаграма деформування першої фази не залежить, а іншої – залежить від швидкості деформування (навантажування). Сумарна діаграма залежить від швидкості навантаження.

Розглянутий підхід дає можливість розкрити вплив параметрів і потребує значень, які необхідно отримати на основі експериментальних даних.

Другий спосіб оснований на використанні двох моделей із умови частотннезалежного та частотнзалежного опору середовища.

Розрахункова схема акустичного апарату в умовах взаємодії із технологічним середовищем ідентична для обох способів (рис. 1), за винятком закону зміни в'язкості.

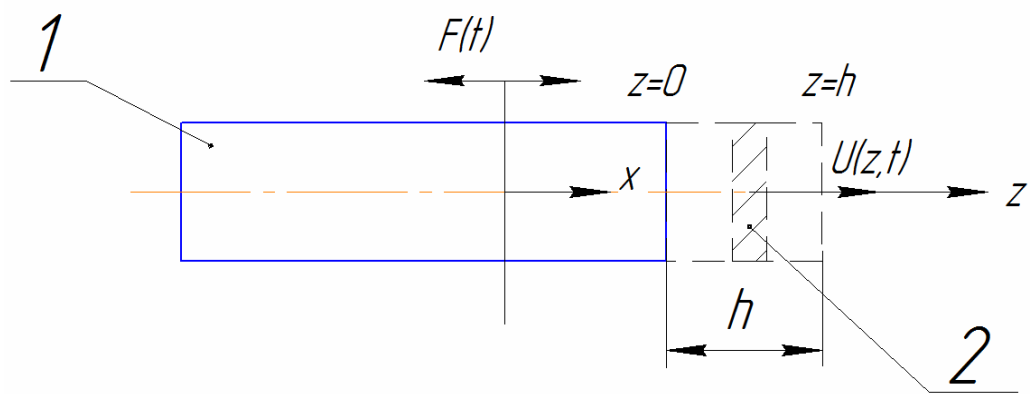


Рис. 1. Розрахункова схема система «апарат-середовище»:
1 – апарат; 2 – середовище; x – переміщення апарата; $F(t)$ – періодична змушуючи сила; $U(z, t)$ – поздовжнє переміщення поточного перерізу оброблюваного середовища при коливаннях; це переміщення залежить від місця розташування перерізу /координати z і від часу t

Задача полягає у визначенні тиску для відповідних перерізів технологічного середовища.

Для цієї мети необхідно знайти аналітичне вираження для тиску в контактній або в іншій зоні, взявши за вихідну модель ту або іншу розрахункову схему середовища, що знаходиться в напружено-деформованому стані. Будемо виходити із загальних положень щодо середовища, як системи з розподіленими параметрами.

Хвильове рівняння за частотннезалежною моделлю має вигляд:

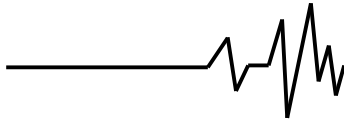
$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\rho}{E^*} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (9)$$

де ρ – щільність середовища; E^* – комплексний модуль пружності.

Закон напружено-деформованого стану описується залежністю:

$$\sigma = E\varepsilon + iE\varepsilon\dot{\gamma}, \quad (10)$$

де i – уявна одиниця, яка вказує на поворот вектора напруженої складової $E\varepsilon\dot{\gamma}$ відносно пружної $E\varepsilon$ на кут $\pi/2$, тобто непружна



складова має напрямок, що протилежний напрямку швидкості; γ – коефіцієнт втрат, який оцінює рівень енергії, що розсіюється в середовищі за один цикл коливань.

Якщо прийняти загальний закон зміни сили:

$$F(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n e^{in\omega t}, \quad (11)$$

де

$$\omega = \frac{2\pi}{T};$$

$$n = \pm 1; \dots \pm 2; \dots F_n = F_n^* = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} F(\tau) e^{-in\omega\tau} d\tau,$$

то рішення вихідного рівняння, відповідно до методу Фур'є, може бути представлено комплексною хвильовою функцією:

$$U(z, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (U_{1n} e^{k_n z} + U_{2n} e^{-k_n z}) e^{in\omega t}. \quad (12)$$

Переміщення U визначається добутком двох функцій, одна з яких залежить від аргументу $z(z) = U_1 e^{nk_n z} - U_2 e^{-nk_n z}$, а інша – тільки від аргументу $T_n(t) = e^{in\omega t}$.

У рішенні (12) U_{1n} і U_{2n} – постійні, обумовлені із граничних умов:

$$\text{при } z = 0 \quad U(0, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n e^{in\omega t}, \quad (13)$$

x_n – розкладання в ряд Фур'є переміщення робочого органа;

$$\text{при } z = h \quad \sigma|_{z=h} = 0. \quad (14)$$

Тоді, прирівнюючи коефіцієнти при однакових гармоніках,

$$U_{1n} + U_{2n} = x_n$$

$$U_{1n} e^{h(\alpha_n + i\beta_n)} - U_{2n} e^{h(\alpha_n + i\beta_n)} = 0,$$

звідки

$$U_{1n} = \frac{x_n e^{-h(\alpha_n + i\beta_n)}}{e^{-h(\alpha_n + i\beta_n)} + e^{h(\alpha_n + i\beta_n)}}; \quad (15)$$

$$U_{2n} = \frac{x_n e^{h(\alpha_n + i\beta_n)}}{e^{-h(\alpha_n + i\beta_n)} + e^{h(\alpha_n + i\beta_n)}}. \quad (16)$$

Тиск середовища на коливання апарата(контактна зона), після відповідних перетворень:

$$P(0, t) = \rho h U_1 \omega^2 \sqrt{N_1^2 + N_1^2}, \quad (17)$$

де U_1 – амплітуда коливань контактної зони; N_{1n} і N_{2n} – хвильові коефіцієнти:

$$N_{1n} = \frac{\alpha_n \operatorname{sh} 2\alpha_n h + \beta_n \sin 2\beta_n h}{h(\alpha_n^2 + \beta_n^2) [ch 2\alpha_n h + \cos 2\beta_n h]}; \quad (18)$$

$$N_{2n} = \frac{\alpha_n \sin 2\beta_n h - \beta_n \operatorname{sh} 2\alpha_n h}{h(\alpha_n^2 + \beta_n^2) [ch 2\alpha_n h + \cos 2\beta_n h]}. \quad (19)$$

Для практичного використання залежності (17) необхідно знати акустичні параметри середовища, що входять у формули (18 – 19).

Хвильове рівняння, з урахуванням частотнозалежного опору буде мати наступний вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{4\eta\partial}{3\rho\partial t} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \quad (20)$$

де c - швидкість розповсюдження хвиль; η - коефіцієнт в'язкості.

Для випадку гармонійних коливань, що відбуваються при ультразвуковому впливі, амплітуда коливань має вигляд:

$$u = u(x) \sin(\omega t). \quad (21)$$

Підстановкою виразу (21) у (22) отримаємо диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, рішення якого має вигляд:

$$u(x) = A \cos(\gamma_p x) + B \sin(\gamma_p x), \quad (22)$$

де γ_p – комплексна постійна розповсюдження хвилі, котра з урахуванням впливу в'язкого тертя визначається за формулою:

$$\gamma_p = k - i\beta = \frac{\omega}{c} - i \left(\frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^3} \right) \quad (23)$$

Тоді вираз для амплітуди коливань буде мати вигляд:

$$u = (A \cos(\gamma_p x) + B \sin(\gamma_p x)) \sin(\omega t). \quad (24)$$

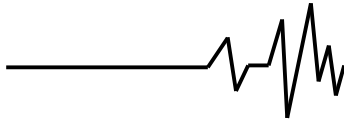
Диференціюючи вираз (24) по часу, отримаємо вираз для швидкості:

$$v = \omega (A \cos(\gamma_p x) + B \sin(\gamma_p x)) \cos(\omega t). \quad (25)$$

Після диференціювання виразу (25) по часу, отримаємо вираз для визначення прискорення. Інтеграл від прискорення по координаті з урахуванням другого закону І. Ньютона буде дорівнювати тиску звукової хвилі:

$$P(x) = -\frac{\rho\omega^2}{\gamma_p} (A \sin(\gamma_p x) - B \cos(\gamma_p x)). \quad (26)$$

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. 1). У якості початкової умови зручно використовувати значення коливальної швидкості на випромінюваній поверхні ультразвукового перетворювача. Прийmemo межу розподілу перетворювач – шар рідини за початок відліку, тобто $x = 0$ і, таким чином, $v = v_0$. При $x = h$ має місце межа розподілу рідина – газ, на якій згідно з прийнятими допущеннями коефіцієнт відбиття хвилі дорівнює одиниці, і так як $\rho c \gg \rho_{\text{впл}} c_{\text{впл}}$, маємо на межі вузол звукового тиску.

Підставляючи отримані граничні умови в рівняння (25) і (26), отримуємо вирази для постійного інтегрування:

$$\begin{aligned} A &= \frac{v_0}{\omega}; \\ B &= \frac{v_0 \sin(hx)}{\omega \cos(hx)} \end{aligned} \quad (27)$$

$$P = v_0 \rho \omega \frac{\sqrt{(\sin(kh)ch(\beta h))^2 - (\cos(kh)sh(\beta h))^2}}{\sqrt{(k^2 + \beta^2)} \sqrt{(\cos(kh)ch(\beta h))^2 + (\sin(kh)sh(\beta h))^2}} \quad (30)$$

Отримана формула (30) відрізняється від (17) функціональною залежністю коефіцієнта опору від параметрів акустичного апарату (амплітуди, швидкості).

Висновки

1. Визначена розрахункова схема напруженого стану технологічного середовища на основі структурного та феноменологічного способу моделювання.

2. Отримані аналітичні залежності (17, 30) враховують вплив реологічних властивостей технологічного середовища дають можливість оцінити ефект кавітаційної дії.

3. Порівняння розглянутих моделей та їх аналітичних виразів для визначення тиску потребує числових значень параметрів конкретного середовища.

Список використаних джерел

1. Ультразвуковая технология / под ред. Б.А. Аграната, М.: Металлургия, 1974. – 505 с.

2. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф.

Підставляючи отримані граничні умови (13, 14) у рівняння (26), отримуємо вираз для тиску в шарі середовища в залежності від його товщини:

$$p(x) = \frac{v_0 \rho \omega \sin(\gamma_p (h-x))}{\gamma_p \cos(\gamma_p h)} \quad (28)$$

Практичний інтерес представляє розвиток кавітації в шарі, що безпосередньо межує з поверхнею ультразвукового перетворювача. Опускаючи проміжні перетворювання отримуємо амплітуду тиску:

$$P = v_0 \rho \omega \left| \frac{\sin(\gamma_p h)}{\gamma_p \cos(\gamma_p h)} \right| \quad (29)$$

або з урахуванням формули (23):

Луговской, Н.В. Чухраев. – К.: Київський університет, 2007. – 245 с.

3. Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности: Курс лекций / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков и др. – Бийск: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2010. – 203с.

4. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение, 2001. – 260 с.

5. Бессонов А.А. Теоретические основы электротехники. / А.А. Бессонов. – М. Высшая школа. 1996. – 638с.

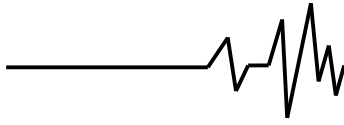
Список джерел в транслітерації

1. Ultrazvukovaya tekhnologiya / pod red. B.A. Agranata, M.: Metallurgiya, 1974. – 505 s.

2. Lugovskoy A.F. Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh / A.F. Lugovskoy, N.V. Chukhrayeva. – K.: Kiyevskiy universitet, 2007 – 245 s.

3. Khmelev V.N. Primeneniye ul'trazvuka vysokoy intensivnosti v promyshlennosti: Kurs lektsiy / V.N. Khmelev, A.N. Slivina, R.V. Barsukov i dr. - Biysk: Izd-vo Alt. gos. un-ta, 2010 – 203 s.

4. Promtova M.A. Pul'satsionnyye apparaty rotornogo tipa : teoriya i praktika / M.A.



Promtova. – М.: Mashinostroyeniye, 2001. – 260 s.

5. Bessonov A.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. / A.A. Bessonov. – М. Vysshaya shkola. 1996 – 638s.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Определен структурный и феноменологический подходы к установлению напряженно-деформированного состояния кавитационной обработки технологических сред. Рассмотрены физико-математические модели обрабатываемых сред с частотнозависимыми и частотнонезависимыми законами изменения диссипативных свойств. Полученные аналитические зависимости и выявленные закономерности изменения динамического давления в слоях технологической среды, которые являются одними из главных параметров влияния на образование и установки кавитационного поля.

Полученные зависимости динамического давления являются теоретической базой для определения рациональных параметров эффективной обработки технологических сред при

использовании ультразвуковых кавитационных технологий.

Ключевые слова: ультразвуковая кавитация, динамическое давление, кавитационное поле, технологическая среда.

DETERMINATION OF THE BASIC PARAMETERS OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT ON THE WORKFLOW ULTRASONIC CAVITATION TREATMENT

Annotation. Structural and phenomenological approaches to establish the stress-strain state of cavitation processing of technological environments is done. Physical-mathematical models of the processed media frequency dependent and frequency independent laws of change of dissipative properties are considered. Analytical dependences and identify patterns of change in the layers of the technological environment of dynamic pressure, which are one of the main parameters influencing on the formation and installation of the cavitation field are got.

Leading out of dependence of dynamic pressure is a theoretical base for determination of rational parameters of effective processing of technological environments at the use of ultrasonic cavitation technologies.

Key words: ultrasonic cavitation, dynamic pressure, cavitation the field, technological environment.