

Методика розрахунку циліндричної ультразвукової кавітаційної камери фільтра з ефектом регенерації

Луговський О. Ф., Зілінський А. І., Шульга А. В., Гришко І. А., Лавріненко А. Д.,
Галецький О. С., Завалій О. П.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

E-mail: a.liashok@kpi.ua

Розглянуті питання розрахунку ультразвукових проточних кавітаторів з циліндричним трубчастим вібратором, для створення систем ультразвукового кавітаційного фільтрування з ефектом регенерації фільтрувального елемента. Запропонована методика розрахунку геометричних розмірів акустичної резонансної системи модульної секції трубчастого ультразвукового кавітатора, що збуджується складеними п'єзоелектричними приводами-випромінювачами, які здійснюють поздовжні коливання і встановлені на зовнішній поверхні трубчастого вібратора. Представлені результати моделювання, які підтверджують можливість створення ультразвукових проточних кавітаторів, вібратор яких збуджується на радіально-згинальній моді коливань, для технологічного процесу ультразвукового кавітаційного фільтрування з ефектом регенерації.

Ключові слова: ультразвуковий кавітаційний реактор; ультразвукова резонансна система; кавітаційне фільтрування; методика розрахунку коливальних систем; трубчастий вібратор; п'єзоелектричний привід поздовжніх переміщень

DOI: [10.20535/RADAP.2020.82.52-60](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.82.52-60)

Вступ

Створення сучасного ультразвукового кавітаційного обладнання для фільтрування робочих рідин у різних технологічних процесах, а саме в створенні штучного мікроклімату ультразвуковим розпиленням [1], очищенні твердих та еластичних поверхонь [2–4], перемішування на молекулярному рівні, знезараженні, дегазації, активуванні рідин, екстрагуванні [5] і т.п., пов'язано із вивченням питань взаємодії рідинного навантаження із ультразвуковими випромінювачами з урахуванням впливу геометричної форми кавітаційної камери. Для досягнення максимальної технологічної ефективності складних коливальних систем необхідно забезпечити рівність частот власних коливань ультразвукового приводу-випромінювача і рідини в об'ємі кавітаційної камери. Тому розрахунок ультразвукового технологічного обладнання необхідно починати з розрахунку частоти власних коливань рідини в кавітаційній камері. Ефективність роботи ультразвукових кавітаційних пристроїв для фільтрування та можливість регенерації їх фільтруючої перегородки є досить нагальним питанням сьогодення [6–9] та напряму залежить саме від якості узгодження навантаження та коливальної системи.

Тому слід зазначити, що резонансна частота випромінювача електроакустичних перетворювачів напряму залежить саме від умов поглинання та розповсюдження ультразвукових хвиль в обмеженому об'ємі кавітаційної камери. Також він залежить від фізичних властивостей рідини, які значно змінюються з появою в ній кавітаційних зон [10], тож питання узгодження випромінювачів з навантаженням значно ускладнюється. Також, ще одним важливим фактором як при виготовленні таких пристроїв, так і при їх розрахунку, є правильність вибору матеріалу з якого зроблена сама кавітаційна камера, оскільки тривалий вплив ультразвукової кавітації викликає корозію або ерозію [11, 12], що може призвести до регулярної заміни деталей або поновлення поверхневих покриттів.

Існує багато відомих робіт [13–15], які присвячені створенню методик розрахунку різноманітних кавітаційних камер, але вони відповідають лише на окремі питання. Тому для побудови ультразвукового фільтра з ефектом регенерації та для підвищення його ефективності необхідно створити методику розрахунку, яка буде враховувати як резонансну частоту електроакустичних випромінювачів, так і складність геометричної форми кавітаційної камери.

1 Постановка задачі

Кавітаційна камера фільтра являє собою доволі складну резонансну систему, яка дозволяє створити всередині її ємності розвинене кавітаційне середовище. Для ефективної роботи камери необхідно узгодити резонансні коливання, синхронно працюючих, п'єзоелектричних приводів-випромінювачів поздовжніх коливань, що встановлюються ззовні здовж твірної лінії циліндричної поверхні камери, з поздовжніми резонансними коливаннями по довжині циліндричної камери та резонансними радіально-згинальними коливаннями по діаметру камери (рис. 1).

В разі збудження радіальної моди коливань за рахунок внутрішньої циліндричної поверхні камери відбувається фокусування ультразвукових коливань здовж осі камери. Це призводить до суттєвого підвищення інтенсивності ультразвукових коливань здовж осі камери (рис. 2) [1]. Таке ультразвукове поле з інтенсивністю більше 100 Вт/см² здатне ефективно інактивувати шкідливі для здоров'я людини мікроорганізми, але на внутрішній поверхні камери інтенсивність буде незначною, недостатньою для збудження ультразвукової кавітації поблизу внутрішньої поверхні.

В разі збудження радіально-згинальних коливань циліндричної поверхні камери, в об'ємі камери утворюється ультразвукове поле середньої інтенсивності з великою кількістю вузлів та пучностей. Якщо ця інтенсивність буде перевищувати поріг виникнення кавітації при даних умовах, то кавітаційна область розповсюдиться по всьому об'єму камери (рис. 3) [5].

Для побудови ультразвукового фільтра з ефектом регенерації необхідно всередині циліндричної резонансної камери розмістити циліндричний фільтрувальний елемент, а кавітаційну область організувати між внутрішньою поверхнею камери та зовнішньою поверхнею фільтрувального елемента. Тому, буде доречним використати збудження поверхні кавітаційної камери на моді радіально-згинальних коливань.

2 Розробка методики розрахунку

Поздовжній розмір циліндричної кавітаційної камери згідно розрахункової схеми (рис. 1) повинен вмещувати парну кількість чвертей довжини хвилі деформації, що встановлюється по довжині камери. Причому на торцях циліндричної камери, де будуть розміщені торцеві кришки, повинні бути вузли хвилі деформації, що встановилася.

Для розрахунку довжини поздовжньої пружної хвилі деформації, тобто відстані між окремими групами п'єзоелектричних приводів-випромінювачів,

що збуджуються синхронно, скористаємося циліндричною системою координат. Будемо вважати, що вісь X співпадає з віссю циліндричної камери, а середній радіус циліндричної камери дорівнює r .

Коливання циліндричної поверхні камери можна представити за допомогою вектору деформації \bar{U} як

$$\bar{U} = \bar{U}_l + \bar{U}_\tau,$$

де \bar{U}_l - потенціальна складова; \bar{U}_τ - соленоїдальна складова.

Згідно [16] довільне векторне поле можна представити у вигляді суми градієнта деякого скалярного поля Φ та ротора векторного потенціалу \bar{A}

$$\bar{U} = \text{grad}\Phi + \text{rot}\bar{A}.$$

Будемо вважати, в нашому випадку відсутні крутильні коливання. Тоді можна прийняти, що $\text{rot}\bar{A} = 0$.

Рівняння Геймгольца [17] для потенціалу Φ запишемо у вигляді

$$c_T^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де $c_T^2 = \frac{2\mu_n + \lambda_n}{\rho_k}$ - швидкість звуку в матеріалі циліндричної камери; λ_n та μ_n - перший та другий коефіцієнти Ламме; ρ_k - щільність матеріалу камери.

Використовуючи метод Фур'є, розв'язок рівняння (1) будемо шукати у вигляді

$$\Phi = f(r) \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}, \quad (2)$$

де $f(r)$ - функція, що залежить від r ; θ - полярний кут; n - ціле число; γ_T - деяка стала величина.

Після підстановки виразу (2) у рівняння (1) для функції $f(r)$ отримаємо

$$f'' + \frac{1}{r} f' + \left(\alpha^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) f = 0, \quad (3)$$

де $\alpha^2 + \gamma_T^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2}$; ω - кругова частота; α - деяка стала величина.

Зробимо підстановку $x = \alpha r$. Це дасть можливість рівняння (3) привести до вигляду

$$f(x)'' + \frac{1}{x} f(x)' + \left(1 - \frac{n^2}{x^2} \right) f(x) = 0.$$

Розв'язок отриманого рівняння Бесселя запишемо у вигляді суми циліндричних функцій Бесселя та Неймана [18]:

$$f(r) = AJ_n(\alpha r) + BN_n(\alpha r),$$

де A та B - константи, що залежать від граничних умов; $J_n(\alpha r)$ - функція Бесселя порядку n ; $N_n(\alpha r)$ - функція Неймана порядку n .

Знайдемо компоненти вектору \bar{U} :

$$\begin{aligned} U_r &= f' \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}; \\ U_\theta &= -\frac{n}{r} f \sin n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}; \\ U_x &= -\gamma_T f \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (4)$$

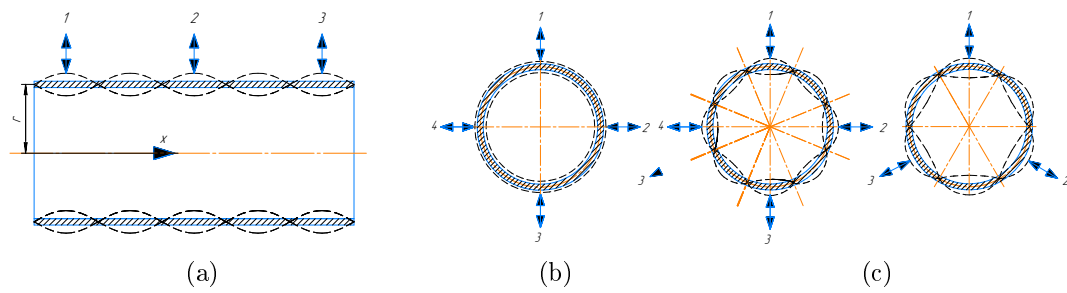


Рис. 1. Розрахункова акустична схема кавітаційної камери фільтру (а – схема збудження згинальних коливань по довжині корпусу; б – схема збудження циліндричного корпусу на радіальній моді коливань; с - схеми збудження радіально – згинальних коливань з парною та непарною кількістю п'єзоелектричних приводів – випромінювачів, що збуджуються синхронно

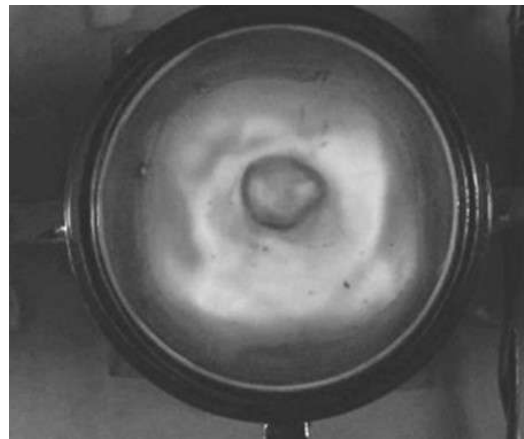
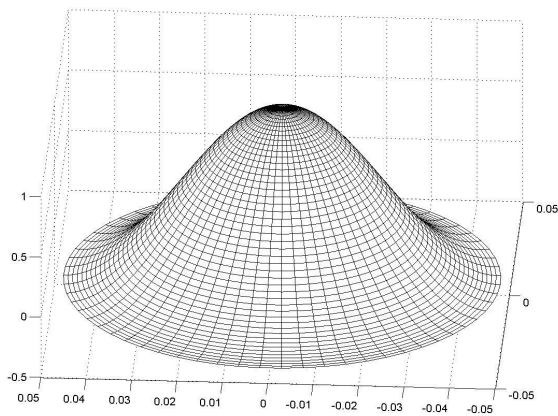


Рис. 2. Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіальної моди коливань поверхні

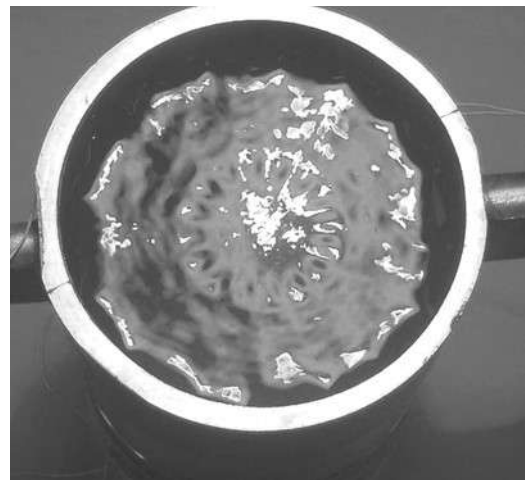
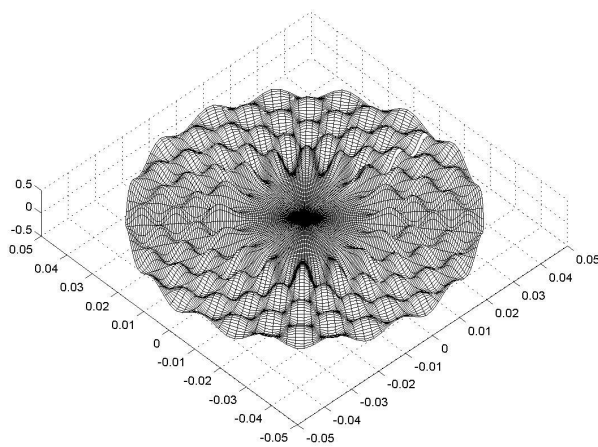


Рис. 3. Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіально-згинальних коливань поверхні

На вільній поверхні циліндричної камери нормальні складові тензора механічного напруження дорівнюють нулю, тобто

$$\sigma_{rr} = 0 \Big|_{r=R_1; r=R_2}.$$

В циліндричній системі координат закон Гука можна виразити рівнянням [17]

$$\sigma_{rr} = \lambda_{\text{л}} \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + 2\mu_{\text{л}} \frac{\partial U_x}{\partial r}.$$

Враховуючи вирази (4), для компонент \bar{U} після перетворень отримаємо

$$\sigma_{rr} = [-\lambda_{\text{л}} (\alpha^2 + \gamma_T^2) f + 2\mu_{\text{л}} f''] \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t}.$$

Після виконання відповідних підстановок отримуємо

$$\left. \begin{aligned} & -\lambda_{\text{л}} (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_1) + BN_n(\alpha R_1)] + \\ & + 2\mu_{\text{л}} [AJ_n''(\alpha R_1) + BN_n''(\alpha R_1)] = 0, \\ & -\lambda_{\text{л}} (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_2) + BN_n(\alpha R_2)] + \\ & + 2\mu_{\text{л}} [AJ_n''(\alpha R_2) + BN_n''(\alpha R_2)] = 0. \end{aligned} \right\} (5)$$

Система рівнянь (5) буде мати ненульовий розв'язок відносно A та B у випадку, коли детермінант D даної системи дорівнює нулю, тобто коли справедливим є запис

$$\begin{aligned} D = & \left[2\mu_{\text{л}} J_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_{\text{л}} \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_2) \right] \times \\ & \times \left[2\mu_{\text{л}} N_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_{\text{л}} \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_1) \right] \\ & - \left[2\mu_{\text{л}} J_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_{\text{л}} \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_1) \right] \times \\ & \times \left[2\mu_{\text{л}} N_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_{\text{л}} \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_2) \right] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Рівняння (6) зручно розв'язати графічним методом відносно α та ω . Це дозволяє отримати γ_T

$$\gamma_T = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2} - \alpha^2}.$$

Тоді відстань між ультразвуковими приводами-випромінювачами на зовнішній поверхні циліндричної кавітаційної камери вздовж осі X може бути знайдена як

$$l_x = \frac{2\pi}{\gamma_T}.$$

Для випадку радіально-згинальних коливань циліндричної поверхні кавітаційної камери резонансна частота визначається залежністю [19]

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2r^2\pi} c_T \frac{h_{\text{к}}}{\sqrt{12}} K_{\lambda},$$

де $h_{\text{к}}$ – товщина стінки камери; $K_{\lambda} = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}} i$ – число хвиль, розміщених по окружності кільця.

| i | K_{λ} | i | K_{λ} |
|-----|---------------|-----|---------------|
| 4 | 14,553 | 8 | 62,516 |
| 5 | 23,534 | 9 | 79,514 |
| 6 | 34,522 | 10 | 98,507 |
| 7 | 47,518 | | |

У випадку збудження радіальної моди коливань трубчатої циліндричної кавітаційної камери резонансна частота може бути розрахована за формулою [19]

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_{\text{к}}}{\rho_{\text{к}} r^2}},$$

де $E_{\text{к}}$ – модуль пружності матеріалу труби кавітаційної камери при розтягуванні.

Узгодження резонансних частот радіальних або радіально-згинальних коливань з коливаннями по довжині камери досягається зміною геометричних розмірів циліндричної трубчатої заготовки.

Для збудження резонансних коливань циліндричної кавітаційної камери можуть бути застосовані п'єзоелектричні приводи - випромінювачі поздовжніх переміщень, побудовані у відповідності до 1, 1/2 або 3/4 хвильових акустичних схем. Доцільно застосовувати в даному випадку ультразвукові приводи-випромінювачі з напівхвильовою акустичною схемою, які забезпечують суттєве зменшення масо-габаритних характеристик фільтра з ефектом регенерації. При цьому, для зменшення негативного впливу привода-випромінювача поздовжніх коливань на форму власних коливань кавітаційної камери, ступінь малого діаметру трансформатора коливальної швидкості привода виконують ножевидною з розміщенням торцевої робочої поверхні на зовнішній поверхні камери вздовж твірної лінії.

Для розрахунку акустичних розмірів ультразвукового п'єзоелектричного привода-випромінювача були здійснені розрахунки з урахуванням відомої методики [5, 20–22].

Напівхвильовий складений п'єзоелектричний привід-випромінювач згідно розрахункової схеми (рис. 4) [5, 20] будується за принципом ультразвукового перетворювача Ланжевена, в якому одна з накладок, що понижують частоту (демпфуючі накладки), виконана у вигляді трансформатора коливальної швидкості, застосування якого дозволяє отримати необхідну величину амплітуди коливань вихідного торця випромінювача. Зазвичай, в якості трансформатора коливальної швидкості застосовують ступінчасті, конічні, експоненціальні, катеноїдальні та інші акустичні концентратори, які за рахунок різниці площ вхідного та вихідного торців забезпечують збільшення амплітуди поздовжніх коливань.

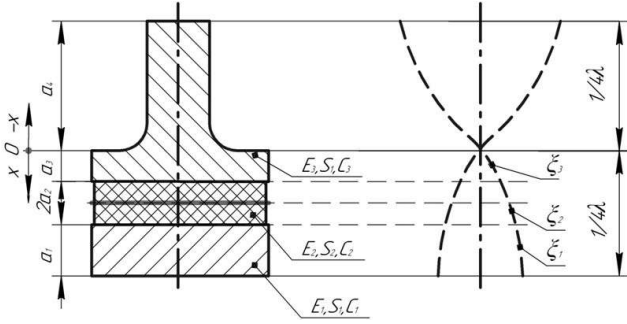


Рис. 4. Розрахункова схема напівхвильового привода-випромінювача

В загальному вигляді рівняння поздовжніх коливань складеного ультразвукового привода-випромінювача можна записати як

$$S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right), \quad (7)$$

де ξ – поздовжнє переміщення; c – швидкість звуку; S – площа поперечного перерізу; x – напрямок розповсюдження хвиль.

В разі застосування в приводі-випромінювачі ступінчастого трансформатора коливальної швидкості коефіцієнт трансформації буде становити

$$K = \frac{S_\delta}{S_M},$$

де S_δ – площа вхідного торця; S_M – площа вихідного торця (торця меншої площі).

Для акустичної системи, що розглядається, в разі збудження гармонійних коливань рішення загального рівняння (7) можна записати як:

$$\xi_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \phi); \quad (8)$$

$$\xi_2(x, t) = \left(C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \phi); \quad (9)$$

$$\xi_3(x, t) = \left(Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi). \quad (10)$$

Згідно розрахункової схеми (рис. 4) граничні умови можна записати у вигляді:

$$\xi_3 = 0 \text{ при } x = -a_3, \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_2 = \xi_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x = 0; \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_2 = \xi_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x = 2a_2; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = a_1 + 2a_2. \quad (14)$$

Приймаючи до уваги умову (11) можна з рівняння (10) отримати

$$Q \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = G \sin \frac{\omega}{c_3} a_3,$$

або

$$Q = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3. \quad (15)$$

Тоді рівняння (10) прийме вигляд

$$\xi_3(x, t) = G \left(\sin \frac{\omega}{c_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x \right) \times \sin(\omega t + \phi). \quad (16)$$

Перша половина граничних умов (12) дозволяє з урахуванням рівнянь (9) та (16) записати

$$C = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \quad (17)$$

Друга половина умов (12) після диференціювання рівнянь (9) та (16) дозволяє записати

$$E_2 S_2 \frac{D}{c_2} = E_3 S_1 \frac{G}{c_3}, \text{ або } \frac{D}{G} = \frac{E_3 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_3}. \quad (18)$$

Тоді, спільне рішення рівнянь (17) та (18) дозволяє отримати

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3}. \quad (19)$$

Гранична умова (14) дозволяє привести рівняння (8) до вигляду

$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2). \quad (20)$$

З урахуванням (20) рівняння (8) перепишемо у вигляді

$$\xi_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} x \right] \times \sin(\omega t + \phi). \quad (21)$$

Приймаючи до уваги першу половину умов (13), рівняння (9) та (21) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} C \left(\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = \\ = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Друга половина граничних умов (13) дозволяє після диференціювання записати рівняння (22) в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} C \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \times \\ \times \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Поділ виразу (22) на (23), а також врахування співвідношення (19) дає можливість отримати

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left(N \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(N \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}, \quad (24)$$

де $N = \frac{E_2 S_2 c_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 c_2 \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}$.

Для розрахунку поздовжнього розміру a_3 акустичної розрахункової схеми (рис. 4) за допомогою формули (24) необхідно задатися бажаними величинами товщини накладки, що понижує частоту, та маркою конструкційного матеріалу, з якого вона буде виготовлена, а також обрати марку п'єзокераміки з її параметрами.

Поздовжній розмір a_4 (рис. 4), ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості можна отримати із залежності

$$a_4 = \frac{c_3}{4f}. \quad (25)$$

Розмір, розрахований згідно формули (25), необхідно скорегувати (зменшити) в залежності від приєднаної маси на робочому торці трансформатора коливальної швидкості. Приєднана маса залежить від моди збуджуваних коливань та способу кріплення акустичної резонансної системи.

Інколи, з метою зменшення габаритів та підвищення потужності проточного ультразвукового кавітаційного обладнання трубчасту кавітаційну камеру виконують секційною з окремих ущільнених трубчастих кілець-вібраторів, довжина яких менша за $\frac{1}{2}$ згинальної хвилі деформації. Це дозволяє позбутися згинальних коливань по довжині циліндричної кавітаційної камери, а, відповідно, і зон з вузлами коливань, в області яких кавітація не збуджується.

3 Результати моделювання

Для перевірки коректності обмежень та припущень, використаних в наведеній методиці, було проведено моделювання роботи акустичної системи, що розглядається, в програмному середовищі Abaqus Student Edition 2018 (рис. 5, 6, 7).

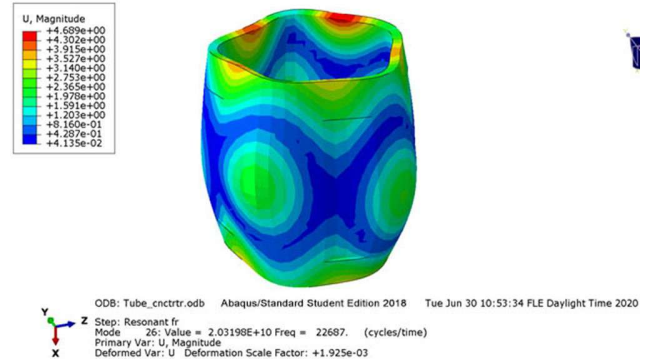


Рис. 5. Моделювання роботи циліндричної камери, збудженої на радіально-згинальній моді коливань

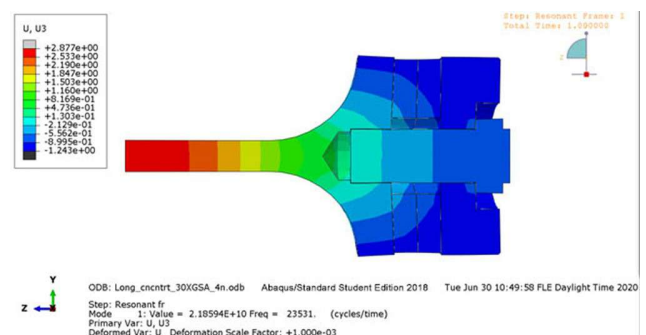


Рис. 6. Моделювання роботи $\frac{1}{2}$ -хвильового привода-випромінювача поздовжніх коливань

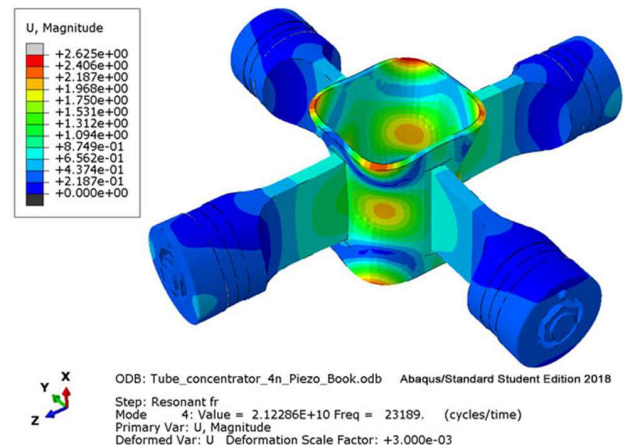


Рис. 7. Моделювання роботи ультразвукової кавітаційної секції з трубчастим вібратором

Запропонована методика розрахунку ультразвукових проточних кавітаторів з трубчастим вібратором дозволила спроектувати та виготовити модульну кавітаційну секцію (рис. 8) для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій.



Рис. 8. Модульна ультразвукова кавітаційна секція з трубчастим вібратором

Висновки

Запропонована методика розрахунку дозволяє проектувати циліндричні ультразвукові кавітаційні камери фільтра з ефектом регенерації. Дана методика враховує як резонансну частоту електроакустичних випромінювачів, так і складність геометричної форми кавітаційної камери ультразвукових пристроїв. Багаторазова практична перевірка представленої методики розрахунку резонансних акустичних систем підтвердила її достатню точність за умови застосованих припущень. Це дозволило створити ефективне ультразвукове кавітаційне технологічне обладнання фільтрування рідин з регенерацією фільтрувальних перегородок, яке знайшло впровадження в кавітаційних технологіях в машинобудуванні, сільському господарстві, харчовій промисловості та медицині.

Перелік посилань

1. Ляшок А. В. Ультразвукове розпилення рідини у мехатронних системах штучного мікроклімату / А. В. Ляшок, О. Ф. Луговський // Промислова гідраліка і пневматика. – 2011. – № 4. – С. 20–25.
2. Яхно О. М. Исследование возможностей технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей / О. М. Яхно, Е. А. Луговская, А. В. Мовчанюк // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2010. – № 58. – С. 234–240.
3. Колос А. А. Ультразвуковая очистка деталей во фреоновых композициях / А. А. Колос // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 2. – С. 192–196.
4. Хмелев В. Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких дисперсных жидких сред / В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев, Р. Н. Голых, А. В. Шалунов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4. – Т. 2. – С. 110–115.
5. Берник І. М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації / І. М. Берник // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – № 3. – С. 69–73.
6. Al-Amoudi A. Fouling strategies and the cleaning system of nf membranes and factors affecting cleaning efficiency / A. Al-Amoudi, R.W. Lovitt // Journal of Membrane Science. – 2007. – pp. 4–28.
7. Regula C. Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic uf membranes: a review / C. Regula, E. Carretier, Y. Wyart, та ін. // Water Research. – 2014. – Vol. 56, № 1. – pp. 325–365.
8. Porcelli N. Chemical cleaning of potable water membranes: a review / N. Porcelli, S. Judd // Separation and Purification Technology. – 2010. – Vol. 44, № 5. – pp. 1389–1398.
9. Wegener K. Fluid elements in machine tools / K. Wegener, J. Mayr, M. Merklein and others // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 66, № 2. – pp. 611–634.
10. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. – В кн.: Физика и техника мощного ультразвука, том. II. Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 167–221
11. Gracey, M. T. Cavitation erosion used for material testing / M.T. Gracey, A.F. Conn // Erosion by liquid and solid impact: proc. of 7th intern. conf. 7 – 10 sept. 1987 – Cambridge. – 1987. – pp. 25 – 34.
12. Linzheng Ye. Damage characteristics and surface description of near-wall materials subjected to ultrasonic cavitation / Ye Linzheng, Zhu Xijing, Wei Xumin, Wu Shu'an // Ultrasonics Sonochemistry. – 2020. – Vol. 67.
13. Методика расчета цилиндрических ультразвуковых кавитационных камер с радиально-изгибными колебаниями стенок / А. В. Мовчанюк // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Машинобудування. – 2015. – № 3. – С. 80–86.
14. Joon Hin Leea. Numerical simulation on ultrasonic cavitation due to superposition of acoustic waves / Hin Leea Joon, Yen Tey Wah, Moon Lee Kiat, Kang Hooi-Siang, Quen Lee Kee // Materials Science for Energy Technologies. – 2020. – Vol. 3. – pp. 593–600.
15. Берник І. М. Методика розрахунку ультразвукового кавітаційного обладнання для технологічного процесу гідролізу-екстрагування пектину / І. М. Берник, І. А. Гришко, О. Ф. Луговський // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4 (56). – С. 123–128.
16. Игнациус Г. И. Теория поля / Г. И. Игнациус. – Москва: Знание, 1971. – 112 с.
17. Лепендин Л. Ф. Акустика / учебн. пособие для вузов / Л. Ф. Лепендин. – Москва: Высшая школа, 1978. – 448 с.
18. Nakayama T. Higher mathematics for physics and engineering / T. Nakayama, H. Shima. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2011. – 694 с.
19. Guggenberger J. Vibrations / J. Guggenberger, G. Müller // Handbook of Engineering Acoustics. – Berlin, Heidelberg : Springer, 2013. – С. 651–690.

20. Зілінський А. Performance increase of ultrasound liquid sprayers / А. Зілінський, А. Мовчанюк, О. Луговський, А. Лавриненков // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2017. – Vol. 2. – С. 113-122. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.111878>
21. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. – Москва: Машиностроение, 1985. – 424 с.
22. Богуслаев В. А. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением. монография / В. А. Богуслаев, В. А. Титов, А. Я. Кочан, та. ін. – Запорожье: Мотор Січ, 2012. – 236 с.
- [11] Gracey M.T. and Conn A. F. (1987) Cavitation erosion used for material testing. Erosion by liquid and solid impact, Proc. of 7th intern. conf., Cambridge, pp. 25-34.
- [12] Ye L., Zhu X., Wei X. and Wu S. (2020) Damage characteristics and surface description of near-wall materials subjected to ultrasonic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 67, pp. 105175. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2020.105175
- [13] Movchanuk A. (2015) Calculation of cylinder ultrasonic cavitation cells with radial - bending fluctuations of the walls. *Journal of Mechanical Engineering*, no. 3, pp. 80-86.
- [14] Lee J.H., Tey W.Y., Lee K.M., Kang H. and Lee K.Q. (2020) Numerical simulation on ultrasonic cavitation due to superposition of acoustic waves. *Materials Science for Energy Technologies*, Vol. 3, , pp. 593-600. DOI: 10.1016/j.mset.2020.06.004
- [15] Bernyk I. M., Gryshko I. A. and Luhovskyi O. F. (2009) Metodyka rozrakhunku ul'trazvukovogo kavitatsijnogo obladnannya dlya tekhnologichnogo procesu gidrolizu-ekstraguvannya pektynu [Method of calculation of ultrasonic cavitation equipment for the technological process of hydrolysis-extraction of pectin]. *Journal of Vibration in engineering and technology*, No 4 (56), pp. 123-128.
- [16] Ignatius G. I. (1971) *Teoriya polya* [Field theory]. Moscow, Science, 112 p.
- [17] Lependin L. F. (1978) *Akustika* [Acoustics]. Moscow, High school publ., 448 p.
- [18] Nakayama T. and Shima H. (2010) *Higher Mathematics for Physics and Engineering*. DOI: 10.1007/b138494
- [19] Guggenberger J. and Müller G. (2013) Vibrations. *Handbook of Engineering Acoustics*, pp. 651-690. DOI: 10.1007/978-3-540-69460-1_22
- [20] Zilinskyi A., Movchanuk A., Luhovskyi O. and Lavrynenkov A. (2017) Performance increase of ultrasound liquid sprayers. *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 0, Iss. 80. DOI: 10.20535/2521-1943.2017.80.111878
- [21] Kumabe D. (1985) *Vibratsionnoye rezaniye* [Vibration cutting]. Moscow: Mechanical Engineering, 424 p.
- [22] Boguslaev V. A., Titov V. A., Kochan A. Ya. (2012) *Formirovaniye poverkhnostnogo sloya detaley vyglazhivaniyem s ultrazvukovym nagruzheniyem* [Formation of the surface layer of parts by burnishing with ultrasonic loading]. Zaporozhye, Motor Sich, 236 p.

References

- [1] Liashok A. V. and Luhovskyi O.F. (2011) Ultrazvukove rozpylennia ridynu u mekhatronnykh systemakh shtuchnoho mikroklimatu [Ultrasonic spraying of liquid in mechatronic systems of artificial microclimate]. *Promysova hidravlika i pnevmatyka*, no 4, pp. 20–25.
- [2] Jakhno O. M., Luhovska K. O. and Movchanuk A. V. (2010) Issledovaniye vozmozhnostey tekhnologii ul'trazvukovoy kavitatsionnoy ochistki elastichnykh poverkhnostey [Study of the capabilities of the technology of ultrasonic cavitation cleaning of elastic surfaces], *Visnyk NTUU «KPI» Mashynobuduvannya*, no. 58, pp. 234-240.
- [3] Kolos A. A. (2014) The ultrasound clearing in freon-compositions, *Visnyk dyuhunobuduvannya*, No 2, pp. 192-196. (In Russian)
- [4] Khmelev V. N., Khmelev S. S., Golykh R. N. and Shalunov A. V. (2014) Ul'trazvukovaya kavitatsionnaya obrabotka vyazkikh dispersnykh zhidkikh sred [Ultrasonic cavitation treatment of viscous dispersed liquid media] *Polzunovskii vestnik*, Vol. 2, No 4, pp. 110–115.
- [5] Bernyk I. M. (2017) Intensyfikatsiia protsesu ekstrahuvannya roslynnoi syrovyny z vykorystanniam ultrazvukovoi kavitatsii [Intensification of the process of extraction of vegetable raw materials using ultrasonic cavitation], *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, Iss. 3, pp. 69-73.
- [6] Al-Amoudi A. and Lovitt R.W. (2007) Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency. *Journal of Membrane Science*, Vol. 303, Iss. 1-2, pp. 4-28. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.06.002
- [7] Regula C., Carretier E., Wyart Y., Gésan-Guizou G., Vincent A., Boudot D. and Moulin P. (2014) Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review. *Water Research*, Vol. 56, pp. 325-365. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.050
- [8] Porcelli N. and Judd S. (2010) Chemical cleaning of potable water membranes: A review. *Separation and Purification Technology*, Vol. 71, Iss. 2, pp. 137-143. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.12.007
- [9] Wegener K., Mayr J., Merklein M., Behrens B., Aoyama T., Sulitka M., Fleischer J., Groche P., Kaftanoglu B., Jochum N. and Möhring H. (2017) Fluid elements in machine tools. *CIRP Annals*, Vol. 66, Iss. 2, pp. 611-634. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.008
- [10] Sirotyuk M.G. and Rosenberg L. D. ed. (1968) *Eksperymentalnyye issledovaniya ultrazvukovoy kavitatsii* [Experimental studies of ultrasonic cavitation. - In the book: Physics and technology of powerful ultrasound, Vol. II. Powerful ultrasonic fields]. Moscow, Science Publ., pp. 167-221

Методика расчета цилиндрической ультразвуковой кавитационной камеры фильтра с эффектом регенерации

Луговской А. Ф., Зилинский А. И., Шульга А. В., Гришко И. А., Лавриненков А. Д., Галецкий А. С., Завалий А. П.

Введение. Создание современного ультразвукового кавитационного оборудования для фильтрации рабочих жидкостей в различных технологических процессах, связано с изучением вопросов взаимодействия жидкостной нагрузки с ультразвуковыми излучателями с учетом влияния геометрической формы кавитационной камеры. Их согласование напрямую влияет на эффективность работы ультразвуковых кавитационных устройств для фильтрации и является достаточно актуальным вопросом на сегодня.

Постановка задачи. Для построения ультразвукового фильтра с эффектом регенерации и для повышения его эффективности необходимо создать методику расчета, которая будет учитывать как импеданс электроакустических излучателей, так и сложность геометрической формы кавитационной камеры.

Разработка методики расчета. Предложена методика расчета геометрических размеров акустической резонансной системы модульной секции трубчатого ультразвукового кавитатора, что возбуждается сложными пьезоэлектрическими приводами-излучателями, которые осуществляют продольные колебания и установлены на внешней поверхности трубчатого вибратора.

Результаты моделирования. Представлены результаты моделирования в программной среде Abaqus Student Edition 2018, подтверждающие возможность создания ультразвуковых проточных кавитаторов, вибраторы которых возбуждаются на радиально-сгибательной моде колебаний, для технологического процесса ультразвукового кавитационного фильтрации с эффектом регенерации.

Выводы. Предложенная методика расчета позволяет проектировать цилиндрические ультразвуковые кавитационные камеры фильтра с эффектом регенерации. Многократная практическая проверка представленной методики расчета резонансных акустических систем подтвердила ее достаточную точность при примененных предположениях.

Ключевые слова: ультразвуковой кавитационный реактор; ультразвуковая резонансная система; кавитационная фильтрация; методика расчета колебательных систем; трубчатый вибратор; пьезоэлектрический привод продольных перемещений

Method for Calculating a Cylindrical Ultrasonic Cavitation Filter Chamber with a Regeneration Effect

Luhovskyi O. F., Zilinskyi A. I., Shulha A. V., Gryshko I. A., Lavrinenkov A. D., Haletskyi O. S., Zavalii O. P.

Introduction. The creation of modern ultrasonic cavitation equipment for filtering working fluids in various technological processes is associated with the study of the interaction of a liquid load with ultrasonic emitters, taking into account the influence of the geometric shape of the cavitation chamber. The efficiency of the operation of ultrasonic cavitation devices for filtration is a rather urgent issue today and directly depends on the quality of this agreement.

Problem statement. To build an ultrasonic filter with a regeneration effect and to increase its efficiency, it is necessary to create a calculation method that will take into account both the impedance of electro-acoustic emitters and the complexity of the geometric shape of the cavitation chamber. Development of calculation methods. The proposed method for calculating the geometric dimensions of the acoustic resonance system of the modular section of the tubular ultrasonic cavitator, which is excited by folded piezoelectric drive-emitters, which carry out longitudinal vibrations and are installed on the outer surface of the tubular vibrator.

Simulation results. The results of modeling in the Abaqus Student Edition 2018 software environment are presented, confirming the possibility of creating ultrasonic flow cavitators, the vibrator, which are excited in a radial-flexion mode of vibration, for the technological process of ultrasonic cavitation filtration with the regeneration effect.

Conclusions. The proposed calculation technique allows designing cylindrical ultrasonic cavitation filter chambers with a regeneration effect. Repeated practical verification of the presented method for calculating resonant acoustic systems has confirmed its sufficient accuracy under the applied assumptions.

Key words: ultrasonic cavitation reactor; ultrasonic resonance system; cavitation filtration; methodology for calculating oscillatory systems; tubular vibrator; piezoelectric drive for longitudinal movements