

УДК 621.647.23

Мовчанюк А.В., к.т.н., доц., Луговська К.О., інж., Фесіч В.П., інж.
НТУ України «Київський політехнічний інститут»

ВРАХУВАННЯ РІДИННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ РОЗРАХУНКУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КАВІТАТОРІВ

Для повышения точности расчетов продольных акустических размеров ультразвуковых резонансных кавитаторов предложена методика дополнительного учета жидкостной нагрузки технологических кавитационных емкостей.

To improve the accuracy of calculations of the longitudinal size of ultrasonic acoustic resonance cavitator the technique of adding the liquid loading process cavitation tanks.

Вступ

Ультразвукова кавітаційна технологічна апаратура широко застосовується на підприємствах машинобудівної, приладобудівної, хімічної та інших галузях господарства. Вказана апаратура містить, перш за все, технологічну ємність проточного або непроточного типу, в яку відбувається випромінювання ультразвукових коливань з інтенсивністю, що перевищує поріг кавітації [1-3]. Для введення технологічну в рідину ультразвукових коливань застосовуються резонансні приводи-випромінювачі (ультразвукові кавітатори). Відомі конструкції резонансних приводів-випромінювачів, які забезпечують виникнення в рідині ультразвукової кавітації, дозволяють вводити в рідину коливання як малої амплітуди, так і великої, яка досягається за рахунок застосування трансформаторів коливальної швидкості [4,5]. Свідомий та обґрунтований вибір конструкцій та необхідних параметрів резонансних кавітаторів дозволяє досягти високого рівня якості кінцевого технологічного результату кавітаційної обробки.

Більшість відомих методик розрахунку ультразвукових резонансних приводів зосереджена на отриманні поздовжніх акустичних розмірів елементів приводів з урахуванням характеристик матеріалів, що застосовуються [4,6-8]. При цьому, у більшості випадків, навантаження враховується, наприклад, як приєднана маса (маса рідини при ультразвуковому кавітаційно-хвильовому розпиленні, маса поверхні розпилення, маса пуансону при кавітаційній обробці каміння або різального інструменту при вібраційному різанні), а виникаючі в технологічному процесі додаткові сили компенсуються за рахунок додаткової потужності, що підводиться.

Метою даної статті є підвищення точності розрахунків ультразвукових кавітаційних приводів-випромінювачів шляхом врахування рідинного навантаження.

Методика

Ультразвукові кавітатори забезпечують утворення ультразвукової кавітації за рахунок введення в рідину ультразвукових коливань великої інтенсивності. При цьому, якщо розглядається високоамплітудний резонансний кавітатор, то з рідиною контактує поверхня випромінювання трансформатора коливальної швидкості, яка виконується на вихідному ступені малого діаметру (рис. 1).

Імпеданс випромінювання поршня може бути представлений як [9]

$$Z = S \rho_p c_p \left[\left(1 - 2 \frac{J_1(2a)}{2a} \right) + j \frac{2S_1(2a)}{2a} \right], \quad (1)$$

де S - площа поршня, ρ_p - густина середовища, c_p - швидкість звуку в рідині, $J_1(2a)$ - функція Бесселя першого порядку, $a = \frac{2\pi r_0}{\lambda_p}$, r_0 - радіус поршня, λ_p - довжина хвилі в середовищі, $S_1(2a)$ - функція Струве першого порядку.

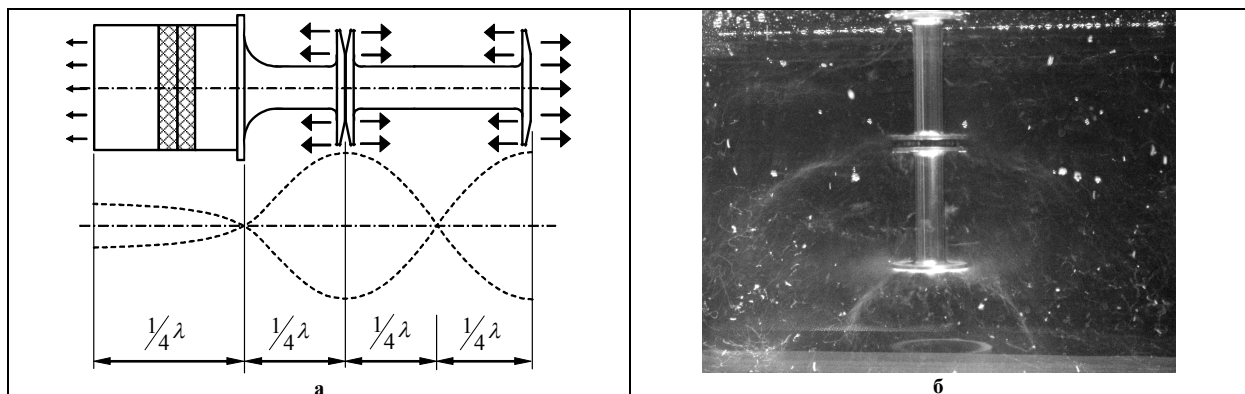


Рис.1 Ультразвуковий кавітатор з розвиненою поверхнею випромінювання
(а - акустична схема, б – робота в зануреному в рідину стані)

Інакше вираз (1) можна представити у вигляді

$$Z = S\rho c[R(a) + jY(a)],$$

де $R(a)$ - активна складова імпедансу, $Y(a)$ - реактивна складова імпедансу.

Тоді можна записати:

$$R(a) = 1 - \frac{J_1(4\pi \frac{r_0}{\lambda_p})}{2\pi \frac{r_0}{\lambda_p}} \quad \text{та} \quad Y(a) = \frac{S_1(4\pi \frac{r_0}{\lambda_p})}{2\pi \frac{r_0}{\lambda_p}}.$$

Введемо позначення $2 \frac{r_0}{\lambda_p} = n$, тобто n дорівнює відношенню діаметру до довжини хвилі в рідині, та отримаємо:

$$R(a) = 1 - \frac{J_1(2\pi n)}{\pi n}, \quad Y(a) = \frac{S_1(2\pi n)}{\pi n}.$$

Дійсна частина акустичного імпедансу (активна складова) характеризує дисипацію ультразвукової енергії в самій акустичній системі привода-випромінювача та втрати енергії на випромінювання звуку. Уявна частина акустичного імпедансу (реактивна складова) характеризує реакцію сил інерції або пружних сил.

Присутність реактивної складової в імпедансі приводить до того, що при навантаженні рідиною буде змінюватись резонансна частота перетворювача, внаслідок чого буде падати ефективність його роботи.

Для того, щоб фактична резонансна частота відповідала розрахунковій необхідно вкоротити ту частину перетворювача або трансформатора коливальної швидкості, яка контактує з рідиною, на величину, що відповідає реактивній складовій імпедансу випромінювання.

Скориставшись методом електроакустичних аналогій можна записати, що вхідний імпеданс відрізка стрижня короткозамкненого (акустичний холостий хід) виражається залежністю

$$Z_{ex} = jZ_0 \operatorname{tg} \left(2\pi \frac{l}{\lambda_m} \right), \quad (2)$$

де $Z_0 = \rho_m c_m S$ - акустичний імпеданс матеріалу, з якого зроблено стрижень, ρ_m - густина матеріалу стрижня, c_m - швидкість звуку в матеріалі стрижня, l - довжина стрижня, λ_m - довжина хвилі в матеріалі стрижня.

Отже повинна виконуватися умова

$$S\rho_m c_m \operatorname{tg} \left(2\pi \frac{l}{\lambda_m} \right) = S\rho_p c_p \frac{S_1(2\pi n)}{\pi n}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$l = \frac{\lambda_m}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{\rho_p c_p S_1(2\pi n)}{\rho_m c_m \pi n} \right].$$

З врахуванням того, що $2\pi n = \frac{d\omega}{c_p}$, а $\frac{\lambda_m}{2\pi} = \frac{c_m}{\omega}$, де d - діаметр стрижня, $\omega = 2\pi f$ - колова частота, f - частота коливань, запишемо:

$$l = \frac{c_m}{\omega} \operatorname{arctg} \left[\frac{2\rho_p c_p S_1 \left(\frac{d\omega}{c_p} \right)}{\rho_m c_m \frac{d\omega}{c_p}} \right].$$

Скориставшись даним виразом можна розрахувати величину скорочення стрижня.

Після підстановки отримаємо залежність величини скорочення від частоти та діаметра випромінювача.

Якщо прийняти довжину ступеню малого діаметру ступінчастого трансформатора коливальної швидкості рівною $\lambda_m/4$ або $\frac{\pi c_m}{2\omega}$, можемо отримати відносне скорочення цього ступеню у відсотках:

$$\bar{l} = \frac{l}{\left(\frac{\lambda_m}{4} \right)} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{\rho_p c_p^2 S_1 \left(\frac{2d\omega}{c_p} \right)}{\rho_m c_m \pi d\omega} \right].$$

Інший варіант - введення корегуючого коефіцієнту $K = (1 - \bar{l})$, на який необхідно скорочувати довжину ступеню малого діаметру трансформатора коливальної швидкості при його зануренні в рідину. Це дозволяє врахувати реактивну складову імпедансу при випромінюванні ультразвукових коливань в рідину.

Розглянемо величину відхилення резонансної частоти стрижня при навантаженні його рідиною.

Резонанс буде спостерігатися у випадку суто активного акустичного опору, звідки випливає, що для навантаженого і не навантаженого стрижня повинна виконуватися рівність:

$$Z_{ex.(\text{навантаж})} = Z_{ex.(\text{ненавантаж})} = 0.$$

З урахуванням залежності (2) отримаємо:

$$\operatorname{tg}\left(2\pi\frac{l_1}{\lambda_1}\right) = \operatorname{tg}\left(2\pi\frac{l_2}{\lambda_2}\right).$$

Після нескладних перетворень можна записати:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{l_1}{l_2} = K.$$

Тоді абсолютне відхилення частоти резонансу випромінювача при навантаженні рідиною можна представити залежністю

$$\Delta\omega = \omega(1 - K).$$

Висновки

Запропонована методика дозволяє на стадії проектування ультразвукових приводів-випромінювачів врахувати вплив на резонансну частоту коливань умов рідинного навантаження. Це дозволить зробити необхідне корегування поздовжніх акустичних розмірів випромінювача та забезпечити відповідність резонансних частот, а, відповідно, і сталість вузлової точки кріплення ультразвукового перетворювача. В такому випадку можна забезпечити максимальну ефективність застосування приводів-випромінювачів в ультразвукових кавітаційних технологіях.

Список Літератури

1. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии). – М.: Химия, 1983. – 192 с.
2. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат, Башкиров В.И., Ю.И. Китайгородский, Н. Н. Хавский. Под ред. Б.А. Аграната. // - М.: Металлургия, 1974. – 503 с.
3. Федоткин И.М. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1 / И.М. Федоткин, И.С. Гулый // - К.: Полиграфкнига, 1997. – 839 с.
4. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев // - К.: ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.
5. Ультразвуковые приводы для кавитационных технологий / А.Ф. Луговской, В.П. Фесич, А.В. Мовчанюк // - Промислова гідраліка і пневматика, № 4 (22),-Вінниця, 2008, с. 28-34.
6. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Пер. с яп. Л.Масленникова / Под ред. И.И.Портнова, В.В.Белова // - М.: Машиностроение, 1985.- 424 с.
7. Луговская Е.А. Методика расчета ультразвукового резонансного кавитатора с развитой поверхностью излучения // – Вест. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т»: серия «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2009.- № 2(4). – С.13-19.
8. Кичуци Е. Ультразвуковые преобразователи. Пер. с англ./ Под ред. И.Л. Голяминой. – М.: Мир, 1972. - 424 с.
9. Лепендин Л.Ф. Акустика / Учебн. Пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.