

Акустические приборы и системы

УДК 534.232

О.І. Дрозденко

Критерій для оцінювання потенційних кавітаційних можливостей електроакустичних перетворювачів, що працюють у рідині

Проанализированы физические факторы, которые характеризуют кавитационные явления, возникающие при работе электроакустических преобразователей в жидкостях, и предложен критерий для оценки потенциальных кавитационных возможностей преобразователей, зависящий только от свойств самих преобразователей.

The analysis of physical factors that describe the cavitation phenomena arising during operation of electroacoustic transducer in liquids is considered. The criteria for estimation of potential cavitation ability of transducers depending only on properties of transducers themselves is offered.

Ключевые слова: акустична кавітація, електроакустичний перетворювач, фактор кавітації, кавітаційна міцність рідини, ближнє поле випромінювача, акустична потужність.

Вступ

Під час роботи електроакустичних перетворювачів, що працюють у водному середовищі, виникає ряд навантажень, які створюються умовами експлуатації. Одним із них, що обмежує випромінювальну акустичну потужність, є акустична кавітація – виникнення місцевих розривів рідини під дією великих розтягувальних зусиль, які перевищують сили зчеплення між її часточками, з утворенням порожнин та наступним їх захлопуванням.

Крім того, акустичний випромінювач, що працює в режимі кавітації, зазнає її руйнуючого впливу, зумовленого двома причинами: з одного боку, зниженням хвильового опору робочого середовища й пов'язаного з цим зростанням механічних напружень в активному матеріалі випромінювача, з іншого – сильними гідродинамічними ударами, що виникають під час захлопування кавітаційних порожнин [1].

Кавітаційне руйнування є складною взаємодією механічних, хімічних і електричних факторів. Однак основна причина цього руйнування – механічні напруження і перші корозійні тріщини внаслідок утомленості, що з'являються в зонах, де найбільших величин досягають зна-

козмічні напруження, а не в зонах максимуму кавітаційної ерозії.

Перетворювачі, які розраховані на тривалу роботу в складі гідроакустичної апаратури, а також випромінювачі, що створюють кавітацію в технологічних апаратах для здійснення та інтенсифікації різноманітних технологічних процесів, потребують захисту від негативної дії кавітації.

Під час проектування та конструювання електроакустичних випромінювачів, що працюють у рідині, слід обов'язково враховувати таку дію кавітації та вживати заходи щодо запобігання її виникненню. Однак переважна більшість робіт із цього питання стосується кавітації, що виникає у гідротехнічних установках [2, 3], і не враховує специфіки акустичної кавітації, наприклад, розподілу звукового тиску біля випромінювальної поверхні перетворювача. У промисловості широко застосовуються акустичні технології з використанням кавітації, але інформація про потенційні можливості перетворювача зводиться до залежності від площі випромінювальної поверхні [4]. Що ж до специфіки впливу кавітації на гідроакустичний випромінювач, то таких даних у літературі практично немає.

Метою цієї роботи є аналіз фізичних факторів, які можна запропонувати як технічні характеристики перетворювачів для оцінювання потенційних кавітаційних можливостей їх конструкцій.

Види акустичної кавітації та фізичні фактори, що її характеризують

Під час розгляду впливу кавітації на гідроакустичну апаратуру варто розрізняти локальну й розвинену кавітації. За локальної кавітації у певній точці звукового поля настає розрив рідини й утворюється одна або кілька поодиноких кавітаційних порожнин. За розвиненої кавітації перед випромінювальною поверхнею утворюється велика кількість порожнин, які перешкоджають поширенню акустичної енергії у водне середовище.

Зручною технічною характеристикою гідроакустичної апаратури, що визначає можливість

максимального випромінювання акустичної енергії у водне середовище, є *поріг кавітації випромінювача*.

Під кавітаційним порогом випромінювача будемо розуміти середню по його поверхні питому акустичну потужність, обмежену кавітацією. Слід зазначити, що використання під час розрахунку повної випромінюваної потужності поняття питомої потужності, обмеженої кавітацією, практично виправдане лише для випромінювачів (одиначних або тих, що перебувають у складі багатоелементної антени) порівняно малих хвильових розмірів.

Що стосується допустимої акустичної потужності, випромінюваної багатоелементною антеною, то ця потужність, у загальному випадку, менша від добутку питомої потужності, обмеженої кавітацією, і повної площі антени й визначається сумарною потужністю окремих її елементів.

Помітний вплив на поріг локальної й розвиненої кавітації має характер розподілу звукового тиску в ближньому полі випромінювача. Врахування впливу ближнього поля випромінювача на поріг локальної кавітації й порівняльне оцінювання випромінювальної здатності випромінювачів різних типів, за умови відсутності кавітації, можливо здійснювати, використовуючи поняття *фактора кавітації*. Знаючи фактор кавітації випромінювача і величину кавітаційної міцності рідини, можна оцінити поріг локальної кавітації випромінювача.

Слід зазначити, що наявність локальної кавітації практично не впливає на основні електроакустичні характеристики випромінювача і, за наявності заходів, що виключають ерозію його поверхні, не повинна стати на заваді до подальшого збільшення випромінюваної потужності. Головною причиною, що обмежує збільшення випромінюваної потужності, є розвинена кавітація, яка змінює основні електроакустичні характеристики перетворювача, помітно спотворює форму звукового сигналу й перешкоджає поширенню акустичної енергії у водне середовище. Тому основну практичну цінність становлять теоретичні й експериментальні дослідження з визначення порогів розвиненої кавітації, за якої ще можлива надійна робота випромінювального тракту гідроакустичної станції.

Для оцінювання концентрації парогазових порожнин в одиниці об'єму кавітуючої рідини використаємо *індекс кавітації* K :

$$K = \frac{\Delta V}{V},$$

де ΔV – сумарний об'єм кавітаційних бульбашок у фазі їх найбільшого розширення; V – об'єм рідини, що задовольняє такі вимоги:

- лінійні розміри об'єму настільки малі порівняно з довжиною звукової хвилі, що звуковий тиск можна вважати постійним за модулем, а пульсації порожнин синфазними;
- лінійні розміри об'єму набагато більші за розміри кавітаційних порожнин.

Використовуючи залежність показника розвиненості кавітації від величини звукового тиску в середовищі та знаючи характер розподілу звукового тиску в ближньому полі, можна отримати кількісну оцінку порога розвиненої кавітації випромінювача.

Під час роботи гідроакустичного випромінювача кавітація виникає в точці звукового поля, яка найбільше сприяє розриву рідини. Серед факторів, що сприяють локальному розриву рідини, можуть бути: нерівномірний розподіл кавітаційних зародків в області звукового поля поблизу поверхні випромінювача, різні неоднорідності випромінювальної поверхні, що виникли внаслідок особливостей її технологічної обробки й конструктивного оформлення, інтерференційні максимуми звукового поля та ін. За однакової імовірності розподілу поблизу випромінювальної поверхні всіх інших факторів фактори фокусування можуть відігравати головну роль [5].

Тип коливальної системи перетворювача, а також його форма і розміри істотно впливають на характер розподілу основних характеристик звукового поля поблизу випромінювальної поверхні. У свою чергу, оскільки місцеве перевищення звукового тиску кавітаційної міцності рідини може спричинити локальну кавітацію, характер розподілу звукового тиску в ближньому полі випромінювача впливає на допустиму з погляду кавітації питому акустичну потужність.

Фактор кавітації перетворювача

При визначенні фактора кавітації використаємо такі позначення: S – площа випромінювальної поверхні; r_0 – координата точки поверхні випромінювача; r – координата довільної точки простору; ω – кругова частота; $\dot{v}(r_0, \omega)$ і $p(r_0, \omega)$ – коливальна швидкість і звуковий тиск у точці поверхні випромінювача з координатою r_0 ; $\dot{v}(r, \omega)$ і $p(r, \omega)$ – коливальна швидкість і звуковий тиск у точці звукового поля з координатою r .

Вважатимемо, що розрахункові моделі реальних перетворювачів являють собою випромінювальну поверхню, яка перебуває в нескінченному, абсолютно жорсткому екрані й здійснює гармонічні коливання. Опускаючи часовий множник, будемо характеризувати звуко-

вий тиск і коливальну швидкість їхньою амплітудою. Вибравши деяку точку випромінювальної поверхні перетворювача за центр приведення, можна записати:

$$\begin{aligned}\dot{v}(\mathbf{r}_0, \omega) &= \dot{V}_0 f_v(\mathbf{r}_0, \omega); \\ p(\mathbf{r}_0, \omega) &= P_0 f_p(\mathbf{r}_0, \omega); \\ z_S(\mathbf{r}_0, \omega) &= \frac{p(\mathbf{r}_0, \omega)}{\dot{v}(\mathbf{r}_0, \omega)} = \frac{P_0 f_p(\mathbf{r}_0, \omega)}{\dot{V}_0 f_v(\mathbf{r}_0, \omega)} = Z_{S0} \frac{f_p(\mathbf{r}_0, \omega)}{f_v(\mathbf{r}_0, \omega)},\end{aligned}\quad (1)$$

де $z_S(\mathbf{r}_0, \omega)$ – питомий акустичний імпеданс у будь-якій точці випромінювальної поверхні з координатою $\mathbf{r}_0$; $\dot{V}_0$, P_0 і Z_{S0} – коливальна швидкість, звуковий тиск і питомий акустичний імпеданс у точці приведення; $f_v(\mathbf{r}_0, \omega)$ і $f_p(\mathbf{r}_0, \omega)$ – відповідно функції поверхневого розподілу коливальної швидкості та звукового тиску. Тоді

$$p(\mathbf{r}_0, \omega) = z_S(\mathbf{r}_0, \omega) \dot{v}(\mathbf{r}_0, \omega) = Z_{S0} \dot{V}_0 f_p(\mathbf{r}_0, \omega). \quad (2)$$

Вирази, аналогічні виразам (1), (2), можна записати для будь-якої точки простору з координатою $\mathbf{r}$:

$$\begin{aligned}\dot{v}(\mathbf{r}, \omega) &= \dot{V}_0 f_v(\mathbf{r}, \omega); \\ p(\mathbf{r}, \omega) &= P_0 f_p(\mathbf{r}, \omega); \\ z_S(\mathbf{r}, \omega) &= \frac{p(\mathbf{r}, \omega)}{\dot{v}(\mathbf{r}, \omega)} = \frac{P_0 f_p(\mathbf{r}, \omega)}{\dot{V}_0 f_v(\mathbf{r}, \omega)} = Z_{S0} \frac{f_p(\mathbf{r}, \omega)}{f_v(\mathbf{r}, \omega)},\end{aligned}$$

де $z_S(\mathbf{r}, \omega)$ – питомий акустичний імпеданс у будь-якій точці простору з координатою $\mathbf{r}$; $f_v(\mathbf{r}, \omega)$ і $f_p(\mathbf{r}, \omega)$ – відповідно функції просторового розподілу коливальної швидкості й звукового тиску. Тоді

$$p(\mathbf{r}, \omega) = z_S(\mathbf{r}, \omega) \dot{v}(\mathbf{r}, \omega) = Z_{S0} \dot{V}_0 f_p(\mathbf{r}, \omega). \quad (3)$$

Використовуючи характеристики ближнього поля випромінювача, можна записати відомі вирази для його акустичної потужності й опору випромінювання [6]:

$$\begin{aligned}W_{\text{ак}} &= \int_S p(\mathbf{r}_0, \omega) \dot{v}(\mathbf{r}_0, \omega) ds = P_0 \dot{V}_0 \int_S f_v(\mathbf{r}_0, \omega) f_p(\mathbf{r}_0, \omega) ds = \\ &= \dot{V}_0^2 \int_S f_v^2(\mathbf{r}_0, \omega) z_S(\mathbf{r}_0, \omega) ds = \dot{V}_0^2 Z_{S0};\end{aligned}$$

$$Z_S = R_S + jX_S;$$

$$R_S = \alpha(\rho c)_c S;$$

$$X_S = \beta(\rho c)_c S,$$

де Z_S , R_S і X_S – відповідно повний опір випромінювання перетворювача, його активна та реактивна складові; α і β – безрозмірні складові опору випромінювання; $(\rho c)_c$ – хвильовий опір середовища.

Позначивши потенціал елементарного джерела одиничної об'ємної швидкості через $\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega)$, можна записати вираз для звукового тиску в будь-якій точці звукового поля:

$$p(\mathbf{r}_0, \omega) = -j\omega\rho \dot{V}_0 \int_S \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) f_v(\mathbf{r}_0, \omega) ds. \quad (4)$$

Тоді вираз для звукового тиску будь-якої точки поверхні перетворювача матиме вигляд:

$$p(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega\rho \dot{V}_0 \left[\int_S \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) f_v(\mathbf{r}_0, \omega) ds \right]_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_0}. \quad (5)$$

Порівнюючи вирази (2) і (4), а також (3) і (5), можна записати вирази для функцій просторового й поверхневого розподілу звукового тиску:

$$f_p(\mathbf{r}_0, \omega) = -j \frac{\omega\rho}{Z_{S0}} \int_S \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) f_v(\mathbf{r}_0, \omega) ds;$$

$$f_p(\mathbf{r}, \omega) = -j \frac{\omega\rho}{Z_{S0}} \left[\int_S \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0, \omega) f_v(\mathbf{r}_0, \omega) ds \right]_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_0}.$$

Скористаємося відомими співвідношеннями для активної акустичної потужності й активної складової опору випромінювання [6]. Маємо:

$$\text{Re}(W_{\text{ак}}) = \frac{p^2(\mathbf{r}, 0, 0) \cdot 4\pi r^2}{K_K \cdot (\rho c)_c} = \dot{V}_0^2 R_S; \quad (6)$$

$$\text{Re}(Z_S) = \frac{1}{\dot{V}_0^2} \frac{p^2(\mathbf{r}, 0, 0) \cdot 4\pi r^2}{K_K \cdot (\rho c)_c} = R_S,$$

де $p(\mathbf{r}, 0, 0)$ – звуковий тиск на осі характеристики направленості перетворювача; K_K – його коефіцієнт концентрації.

Згідно з виразом (3), звуковий тиск у будь-якій точці простору пропорційний коливальній швидкості центру приведення випромінювача й залежить від функції просторового розподілу звукового тиску в середовищі. Найбільший тиск буде в тій точці простору, де функція просторового розподілу звукового тиску $f_p(\mathbf{r}, \omega)$ максимальна. Припустимо, що функція просторового розподілу звукового тиску має максимум у точці $\mathbf{r} = \mathbf{r}_k$. У цій точці може виникнути локальна кавітація, тобто

$$f_p(\mathbf{r}, \omega) \Big|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_k} = f_{p, \text{max}}(\mathbf{r}, \omega).$$

Тоді

$$p_{\text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega) = Z_{S0} \dot{V}_0 f_{p, \text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega). \quad (7)$$

Скориставшись співвідношеннями (6) і (7), можна записати вираз для активної акустичної потужності:

$$\operatorname{Re}(W_{\text{ак}}) = R_S \frac{p_{\text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega)}{Z_{S0}^2 f_{p, \text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega)},$$

або, враховуючи вираз для R_S , отримаємо:

$$\operatorname{Re}(W_{\text{ак}}) = \frac{\alpha(\rho c)_c S}{Z_{S0}^2 f_{p, \text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega)} p_{\text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega).$$

Припустимо, що амплітуда максимального тиску в середовищі $P_{m, \text{max}}$ не повинна перевищувати певної величини кавітаційної міцності рідини $P_{\text{км}}$. Тобто умова відсутності локальної кавітації визначається співвідношенням

$$P_{m, \text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega) \leq P_{\text{км}}.$$

Тоді за умови відсутності локальної кавітації максимальна акустична потужність, що випромінюється перетворювачем, визначатиметься виразом

$$\operatorname{Re}(W_{\text{ак}})_{\text{max}} = \left[\frac{\alpha S}{\left(\frac{Z_{S0}}{(\rho c)_c} \right)^2 f_{p, \text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega)} \right] \left[\frac{P_{\text{км}}}{2(\rho c)_c} \right],$$

а максимальна питома акустична потужність (середня по поверхні випромінювача інтенсивність звукової енергії) становитиме

$$I_{\text{max}} = \frac{\operatorname{Re}(W_{\text{ак}})_{\text{max}}}{S} = \left[\frac{\alpha}{\left(\frac{Z_{S0}}{(\rho c)_c} \right)^2 f_{p, \text{max}}^2(\mathbf{r}_k, \omega)} \right] \left[\frac{P_{\text{км}}}{2(\rho c)_c} \right]. \quad (8)$$

Таким чином, за допомогою виразу (8) можна дійти висновку, що максимальна випромінювана перетворювачем питома акустична потужність визначається, з одного боку, властивостями самого випромінювача (співмножник у першій квадратній дужці), з іншого боку, властивостями того середовища, в якому він працює (співмножник у другій квадратній дужці).

Позначимо вираз у першій квадратній дужці співвідношення (8) через $\gamma(\mathbf{r}_k)$ і назовемо його *фактором кавітації випромінювача*. Тоді

$$I_{\text{max}} = \gamma(\mathbf{r}_k) \left[\frac{P_{\text{км}}}{2(\rho c)_c} \right]. \quad (9)$$

Отже, питома акустична потужність (середня по поверхні випромінювача інтенсивність звукової енергії), яку перетворювач може випромінити в рідке середовище за умови відсутності ло-

кальної кавітації, буде тим вищою, чим вища кавітаційна міцність рідини $P_{\text{км}}$ і більший фактор кавітації випромінювача $\gamma(\mathbf{r}_k)$. З виразу (8) випливає, що за допомогою фактора кавітації реальне звукове поле випромінювача можна звести до еквівалентного поля плоскої звукової хвилі.

Розглянемо детальніше фактор кавітації випромінювача.

Позначимо

$$\bar{p}(\mathbf{r}_0, \omega) = \frac{1}{S} \int_S f_v(\mathbf{r}_0, \omega) p(\mathbf{r}_0, \omega) ds;$$

$$\bar{f}_p(\mathbf{r}_0, \omega) = \frac{1}{S} \int_S f_v(\mathbf{r}_0, \omega) f_p(\mathbf{r}_0, \omega) ds$$

і назовемо їх "ваговими" середніми звукового тиску та функції його поверхневого розподілу.

В окремому випадку в разі рівномірного розподілу коливальної швидкості по поверхні перетворювача $\bar{p}(\mathbf{r}_0, \omega)$ і $\bar{f}_p(\mathbf{r}_0, \omega)$ є середніми значеннями звукового тиску та його функції поверхневого розподілу. Тобто при $f_v(\mathbf{r}_0, \omega) = 1$

$$\bar{p}(\mathbf{r}_0, \omega) = \frac{1}{S} \int_S p(\mathbf{r}_0, \omega) ds;$$

$$\bar{f}_p(\mathbf{r}_0, \omega) = \frac{1}{S} \int_S f_p(\mathbf{r}_0, \omega) ds.$$

Використовуючи наведені вище співвідношення, можна отримати вираз для фактора кавітації випромінювача:

$$\begin{aligned} \gamma(\mathbf{r}_k) &= \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} \left| \frac{\bar{p}(\mathbf{r}_0, \omega)}{p_{\text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega)} \right|^2 = \\ &= \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} \left| \frac{\bar{f}_p(\mathbf{r}_0, \omega)}{f_{p, \text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega)} \right|^2; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\gamma(\mathbf{r}_k) = \alpha \left| \frac{p_{\text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega)}{(\rho c)_c V_0} \right|^{-2}. \quad (11)$$

З виразів (10) і (11) можна побачити, що фактор кавітації випромінювача визначається добутком двох функцій. Перша функція залежить лише від безрозмірних складових опорів випромінювання перетворювача, а друга – тільки від структури його ближнього поля.

У загальному випадку максимальне значення звукового тиску $p_{\text{max}}(\mathbf{r}_k, \omega)$ може спостерігатись у будь-якій точці простору ближнього поля випромінювача [5]. У такому разі маємо справу з фактором просторової кавітації. Врахо-

вуючи те, що в абсолютній більшості практичних випадків кавітація виникає на межі поділу перетворювач–середовище, фактор просторової кавітації перетворюється на фактор поверхневої кавітації. Вважаючи, що кавітація виникає на поверхні випромінювача в точці $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_{0k}$, вирази для фактора поверхневої кавітації випромінювача можна записати у вигляді

$$\gamma_S(\mathbf{r}_{0k}) = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} \left| \frac{\bar{p}(\mathbf{r}_0, \omega)}{p_{\max}(\mathbf{r}_{0k}, \omega)} \right|^2 = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} \left| \frac{\bar{f}_p(\mathbf{r}_0, \omega)}{f_{p, \max}(\mathbf{r}_{0k}, \omega)} \right|^2; \quad (12)$$

$$\gamma_S(\mathbf{r}_{0k}) = \alpha \left| \frac{p_{\max}(\mathbf{r}_{0k}, \omega)}{(\rho c)_c V_0} \right|^{-2}, \quad (13)$$

де $p_{\max}(\mathbf{r}_{0k}, \omega)$ і $f_{p, \max}(\mathbf{r}_{0k}, \omega)$ – відповідно максимальне значення звукового тиску та його функції поверхневого розподілу.

Як видно з виразів (10)–(13), фактор кавітації випромінювача може змінюватися від 0 до 1.

Висновки

Проаналізовано фізичні фактори, що характеризують локальну і розвинену кавітацію, яка може виникнути під час роботи електроакустичних перетворювачів у рідині.

Для порівняльного оцінювання випромінювальної здатності перетворювачів різних типів як критерій оцінки запропоновано використати фактор кавітації. Знання цього фактора та величини кавітаційної міцності рідини дає можливість розрахувати поріг

кавітації перетворювача конкретного типу в конкретній рідині.

Отримано в загальному вигляді вирази для розрахунків фактора кавітації. Встановлено, що фактор кавітації є добутком двох функцій, одна з яких визначається тільки безрозмірними складовими опору випромінювання перетворювача, а друга – тільки структурою його ближнього поля.

Література

1. Дудзинский Ю.М. Кавитационная эрозия в ближнем поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акустичний вісник. – 2005. – Т. 8, № 4. – С. 46–50.
2. Bregliozzi G., Di Schino A., Haefke H. Cavitation erosion resistance of a high nitrogen austenitic stainless steel as a function of its grain size // Journal of materials science letters. – 2003. – Vol. 22. – P. 981.
3. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.
4. Хмелев В.Н., Попова О.В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
5. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 278 с.
6. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. – К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.