

УДК 623.983

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1\(49\).84-88](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2026.1(49).84-88)

**О. Г. ЛЕЙКО**, доктор технічних наук, професор  
<https://orcid.org/0000-0002-5588-6449>  
(Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», м. Київ)

**Н. В. ГАМАЛІЙ**  
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>

**О. М. ПОЗДНЯКОВА**, кандидат технічних наук  
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>

**І. В. АВЕРІЧЕВ**  
<https://orsid.org/0000-0005-3855-970>  
(Центральний науково-дослідний інститут  
озброєння та військової техніки Збройних Сил  
України, м. Київ)

## ЗВУКОВІ ПОЛЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СТАНЦІЙ З ГНУЧКИМИ ПРОТЯЖНИМИ БУКСИРУВАНИМИ АНТЕНАМИ В ПРИСУТНОСТІ МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ

Ефективність застосування гідроакустичних станцій (ГАС) з гнучкими протяжними буксируваними антенами (ГПБА) для висвітлення підводної обстановки залежить від наявності в умовах експлуатації обмежуючих границь. Це обумовлено тим, що ГАС з ГПБА зазвичай працюють в області інфразвукових і низьких звукових частот. Розглянута задача визначення звукових полів, що формуються ГАС з ГПБА в умовах наявності обмежуючої границі у вигляді морської поверхні. З використанням метода зображень сформульована розрахункова модель системи тіл «морська поверхня – ГПБА». Методами теорії електрогідропружності отримані аналітичні співвідношення, що описують звукові поля, що формуються морською поверхнею, ГПБА і системою тіл «морська поверхня – ГПБА». Показано, що характеристика спрямованості ГПБА в присутності морської поверхні має форму кардіоїди. Отримані матеріали дозволяють зіставити між собою ефективності застосування ГАС з ГПБА в глибоких морях і морях, де присутній вплив морської поверхні на них.

**Ключові слова:** звукові поля, гнучка протяжна буксирувана антена, морська поверхня.

### ВСТУП

Великі сподівання на ефективність застосування гідроакустичних станцій з гнучкими протяжними буксируваними антенами пов'язані із безмежністю умов їх експлуатації в морських середовищах [1]. Такий підхід відповідає звичайній практиці проєктування будь-яких

ГАС. Це обумовлено тим, що на етапі проєктування станцій неможливо передбачити весь діапазон змін акустичних умов їх подальшої експлуатації. Для станцій з ГПБА акустичні умови їх експлуатації полягають в наступному. Звичайно, акустична антена ГАС з ГПБА виконується у вигляді дискретної сквідістантної лінійної решітки із малогабаритних п'єзокерамічних перетворювачів. В більшості випадків це заповнені повітрям циліндричні перетворювачі діаметром порядку 18 мм і такою ж довжиною. Конструкція ГПБА буксирується за надводним кораблем або підводним човном на значній відстані і певній глибині  $H$  і має нейтральну плавучість, що запобігає її зануренню на більшу глибину на стопі корабля або човна. Звичайним діапазоном робочих частот ГАС з ГПБА є інфразвукові та низькі звукові частоти від 5–10 Гц до 200–300 Гц. Без будь-яких фізичних пояснень зрозуміло, що на цих частотах більшість морів у хвильовому відношенні стають мілководними. Тому вплив границь розподілу таких, наприклад, як морська поверхня або морське дно на параметри ГПБА суттєво зростають. Тому виникає необхідність в отриманні кількісних значень оцінки названих впливів. До речі, в кораблебудуванні оцінка впливу акустичних умов експлуатації корабля на розміщені в ньому ГАС є звичайною, хоча і дуже складною справою. Саме це було однією з причин, що обумовили: по-перше, озброєння кораблів ГАС з різними гідроакустичними антенами – розміщеними в корпусі корабля і антенами змінної глибини; по-друге, експлуатацію кораблів в різних ходових режимах – звичайному, стоповому та при буксировці антен змінної глибини, по-третє, розробку ГАС для умов безмежного моря.

**Метою** роботи є дослідження звукових полів ГАС з ГПБА при експлуатації їх в умовах наявності поблизу них морської поверхні розділу «повітря-вода». Це дозволить оцінити ступінь втрати ефективності ГАС з ГПБА в цих конкретних умовах і мати таким чином реальний прогноз виконання поставленої задачі.

### ПОСТАНОВКА І РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Розглянемо задачу визначення звукових полів еквідістантною решіткою в присутності морської поверхні розділу «повітря – вода». Будемо рахувати, що решітка утворена із заповнених повітрям малогабаритних циліндричних перетворювачів і знаходиться від морської поверхні на відстані  $H$ . Відносно морської поверхні будемо рахувати, що вона є ідеальною акустично м'якою поверхнею. Акустична м'якість забезпечується наявністю повітря зі сторони морської поверхні розділу «повітря – вода». Ідеальність морської поверхні, яка взагалі має певну схвильованість, має місце, оскільки ГАС працює в області інфразвукових і низьких звукових частот.

Таким чином, в розрахунковій моделі ГАС з ГПБА потрібно врахувати дві «акустично м'які» поверхні. Перша з них  $P_1$  є плоскою морською поверхнею. Друга  $P_2$  являє собою циліндричну поверхню ГПБА у вигляді тонкої циліндричної заповненої повітрям п'єзокерамічної оболонки з середнім радіусом  $r_0$ , товщиною  $h$ , поляризованої по товщині. Електричний сигнал напругою  $\psi$  знімається з електродів, нанесених на зовнішню і внутрішню циліндричні поверхні п'єзокерамічної оболонки. Сама ГПБА

знаходиться в рідині з густиною  $\rho_1$  і швидкістю звуку  $c_1$  і паралельна морській поверхні  $\Pi_1$ . Вертикальний переріз розрахункової моделі ГПБА в присутності морської поверхні розділу «повітря – вода» і введені для вирішення задачі системи координат наведені на рис. 1.

Шукані звукові поля, які є розв'язком поставленої задачі, можуть бути визначені шляхом сумісного вирішення системи диференціальних рівнянь:

– хвильового рівняння руху пружних середовищ ззовні і всередині перетворювачів антени

$$\Delta\Phi + k^2\Phi = 0; \tag{1}$$

– рівнянь руху тонких оболонок з радіальною поляризацією в зміщеннях

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \frac{h^2}{12r_0^2} \left( 1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E e_{33}^S} \right) \right] \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \\ & + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \frac{h^2}{12r_0^2} \left( 1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E e_{33}^S} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{r_0^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \\ & - \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{h^2}{12r_0^2} \left( 1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E e_{33}^S} \right) \frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - w - \\ & - \frac{h^2}{12r_0^2} \left( 1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E e_{33}^S} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} + \frac{e_{31} r_0}{C_{11}^E} E_r + \\ & + \frac{r_0^2}{h C_{11}^E} q_r - \frac{r_0^2 \gamma}{C_{11}^E} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \end{aligned} \tag{2}$$

– рівнянь вимушеної електростатики для п'єзокераміки

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi; \text{div}\vec{D} = 0. \tag{3}$$

У виразах (1) – (3):  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\Phi$  – потенціал швидкості акустичного поля;  $k$  – хвильове число зовнішнього середовища;  $u$  і  $w$  – кутова і нормальна складові вектора зміщень механічного поля п'єзокерамічної оболонки;  $\gamma$  – густина п'єзокераміки;  $C_{11}^E, e_{31}, e_{33}^S$  – сталі п'єзокераміки: модуль пружності при нульовій електричній напруженості, п'єзоконстанта і діелектрична проникливість при нульовій деформації;

$\vec{E}$  і  $\vec{D}$  – вектори напруженості та індукції електричного поля;  $q_r = (p - p_{en}) \Big|_{r=r_0+h/2}$  – зовнішнє навантаження

п'єзокерамічної оболонки, де  $p$  і  $p_{en}$  – гідродинамічні навантаження у зовнішньому і внутрішньому середовищах перетворювача ГПБА;  $\psi$  – електрична напруга.

Граничні умови задачі формулюються наступним чином. На плоскій морській границі, яка є акустично м'якою,

$$\Phi_\Sigma = 0 \text{ при } x = 0, \tag{4}$$

де  $\Phi_\Sigma$  – потенціал швидкості повного звукового поля, дифрагovanого на системі «морська поверхня – ГПБА».

На п'єзокерамічній поверхні вакуумного перетворювача швидкість нормальних зміщень  $w$  точок поверхні перетворювача повинна бути рівною швидкості коливань середовищ, прилеглих до зовнішньої поверхні перетворювача

$$-\frac{\partial \Phi_\Sigma}{\partial r_1} = \frac{\partial w}{\partial t}, r_1 = r_0 + \frac{h}{2}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \tag{5}$$

Електричні граничні умови задачі для п'єзокерамічного перетворювача довжиною, рівною одиниці, виберемо для режиму його холостого руху, коли струм зміщення в п'єзокераміці дорівнює нулю, у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_0^{2\pi} D r_1 d\varphi_1 dz_1 = 0. \tag{6}$$

Прийняті допущення дозволяють звести пошук рішення до розв'язку плоскої крайової задачі. Розв'язок сформульованої задачі будемо шукати методом зображень [2–4]. Його сутність полягає в тому, що шукане рішення будується з урахуванням введення в розгляд уявного п'єзокерамічного перетворювача (рис. 1). Таке введення накладається на основне рішення, завдяки чому задовольняються граничні умови задачі.

Виходячи із розрахункової моделі, наведеної на рис. 1, повне дифрагovanе поле ГПБА в присутності морської поверхні може бути записано у вигляді

$$\Phi_\Sigma = \Phi_0^{(1)} + \Phi_s^{(1)} + \Phi_0^{(2)} + \Phi_s^{(2)},$$

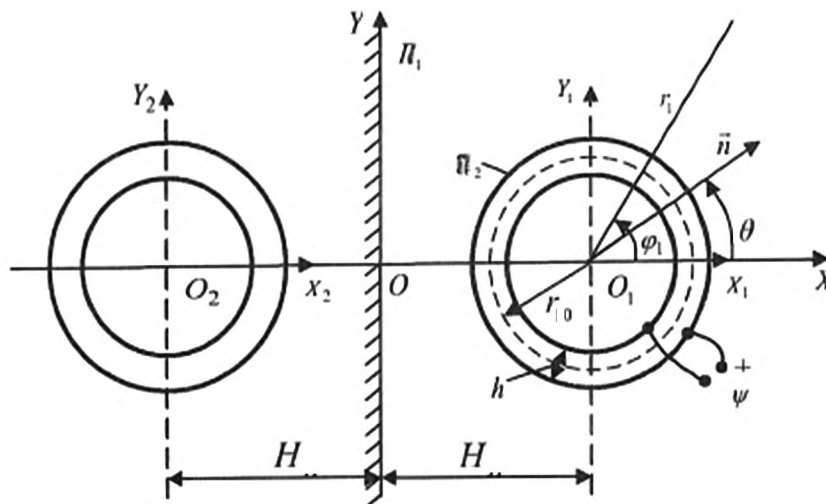


Рис. 1. Нормальний переріз системи тіл «морська поверхня – ГПБА» і введені системи координат

де  $\Phi_0^{(1)}$  – плоска хвиля, що приходить із напрямку  $\theta$  на досліджувану систему;

$\Phi_s^{(1)}$  – плоска хвиля, що відбилася б від плоскої границі розділу  $\Pi_1$  при відсутності циліндричної поверхні  $\Pi_2$ ;

$\Phi_0^{(2)}$  – хвиля, розсіяна п'єзокерамічним перетворювачем  $\Pi_2$  при падінні на нього плоскої хвилі, що приходить;

$\Phi_s^{(2)}$  – хвиля, розсіяна перетворювачем  $\Pi_2$  і відбита від морської поверхні  $\Pi_1$ .

Запишемо всі поля в циліндричних координатах. Поле  $\Phi_\Sigma^{(1)}$  має вигляд:

$$\Phi_\Sigma^{(1)} = \Phi_0^{(1)} + \Phi_s^{(1)} = \sum_n a_n \cdot J_n(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_n b_n \cdot J_n(kr_2) e^{im\varphi_2}, \quad (7)$$

де  $a_n = i^n e^{-im\theta}$  [4, 5],  $J_n$  – функція Бесселя.

Поле  $\Phi_\Sigma^{(2)}$  визначається виразом:

$\Phi_\Sigma^{(2)} = \Phi_0^{(2)} + \Phi_s^{(2)}$  і повинно задовольняти умовам випромінювання на нескінченності:

$$\Phi_\Sigma^{(2)} = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_n B_n H_n^{(1)}(kr_2) e^{im\varphi_2}, \quad (8)$$

де  $A_n$  і  $B_n$  – шукані коефіцієнти,  $H_n^{(1)}$  – функція Ханкеля першого роду.

В задачі, що розглядається, повне дифраговане поле  $\Phi_\Sigma$  повинно задовольняти граничній умові (4) на плоскій поверхні  $\Pi_1$ . Використаємо результати робіт [2–4] для того, щоб у випадку акустичної м'якості морської поверхні  $\Pi_1$  встановити зв'язок між коефіцієнтами у виразах (7) та (8). Згідно з цими роботами цей зв'язок має вигляд:

$$b_n = (-1)^{n+1} a_n; B_n = (-1)^{n+1} A_n. \quad (9)$$

Для того, щоб використати умови спряження звукових полів на криволінійній поверхні  $\Pi_2$ , необхідно виразити всі звукові поля в локальних координатах перетворювача антени. Для цього використовуються теорема складання у вигляді:

$$J_m(kr_2) e^{im\varphi_2} = J_{m-n}(2kH_n) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} e^{im\varphi_1}; \quad (10)$$

$$H_m^{(1)}(kr_2) e^{im\varphi_2} = \sum_n H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} e^{im\varphi_1},$$

де  $\varphi_2$  – полярні координати центру  $\varphi_1$  в системі координат з центром  $\varphi_2$ .

Тоді з урахуванням виразів (9) і (10) звукові поля (7) і (8) з плоскою  $\Pi_1$  і криволінійною  $\Pi_2$  поверхнями, можливо виразити у вигляді:

$$\Phi_\Sigma^{(1)} = \sum_n a_n J_n(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_m (-1)^{m+1} a_m \sum_n J_{m-n}(2kH_n) J_n(kr_1) \cdot e^{i(m-n)\varphi_{21}} \cdot e^{im\varphi_1}; \quad (11)$$

$$\Phi_\Sigma^{(2)} = \sum_n A_n H_n^{(1)}(kr_1) e^{im\varphi_1} + \sum_m (-1)^{m+1} A_m \sum_n H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n(kr_1) \cdot e^{i(m-n)\varphi_{21}} \cdot e^{im\varphi_1}.$$

Алгебраїзація функціонального рівняння (5), другого рівняння системи (2) та електричних граничних умов (6) на основі властивостей повноти і ортогональності сис-

тем функцій  $e^{im\varphi_1}$  на інтервалі  $[0, 2\pi]$  дозволяє отримати наступну систему нескінчених лінійних алгебраїчних рівнянь відносно шуканих коефіцієнтів розкладень  $w_n$  та  $A_n$ :

$$icw_n - A_n H_n^{(1)}(kr_1) - \sum_m (-1)^{m+1} A_{m-n} H_{m-n}^{(1)}(2kH_n) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} = a_n J_n'(kr_1) + \sum_m (-1)^{m+1} a_{m-n} J_{m-n}(2kH) \times J_n'(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}}; n = -\infty, 0, \infty$$

$$w_n R_n + \frac{e_{31} r_1}{C_{11}^E} E_r + \frac{i\omega \alpha \rho}{h} A_n H_n^{(1)}(kr_1) + \frac{i\omega \alpha \rho}{h} \sum_m (-1)^{m+1} A_{m-n} H_{m-n}^{(1)}(kH) \times J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}} = -\frac{i\omega \alpha \rho}{h} a_n J_n(kr_1) - \frac{i\omega \alpha \rho}{h} \sum_m (-1)^{m+1} a_{m-n} J_{m-n}(kH) J_n(kr_1) e^{i(m-n)\varphi_{21}}; n = -\infty, 0, \infty.$$

$$R_n = \frac{(n+n^2\beta)^2 - (1+\beta^4 - \omega^2\alpha\gamma)[(1+\beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma]}{(1+\beta)n^2 - \omega^2\alpha\gamma};$$

$$E_r = \frac{-e_{31}}{r_1 \varepsilon_{33}^s} \cdot w_0 = -\frac{\Psi}{n}; w_0 - \text{амплітуда пульсуючих коливань перетворювача ГПБА.}$$

Система (12) після її перетворення відомими [5, 6] підходами до виду квазірегулярної може бути розрахована методом послідовних наближень або методом редукції. Рівняння (11) і (12) дозволяють визначити звукові поля ГПБА при буксируванні її в зоні впливу морської поверхні. Порівняння кількісних характеристик цих полів з такими ж характеристиками звукових полів при експлуатації ГПБА в глибоких морях, що не мають обмежувача границь, дозволяє визначити ефективність ГАС з ГПБА при наявності впливу на неї морської поверхні.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В якості прикладу визначимо кількісні характеристики звукового поля перетворювача ГПБА в присутності морської поверхні в площинах, нормальних до повздовжньої осі антени. Виберемо робочу частоту ГПБА рівною  $f = 20$  Гц. Для такої робочої частоти всі хвилювання морської поверхні зникають і вона являє собою плоску поверхню. Будемо рахувати, що ГПБА заглиблена від морської поверхні на глибину  $H = 20$  м. Інші параметри ГПБА приймемо наступними. Перетворювач виготовлений із п'єзокераміки ЦТБС-3 з характеристиками: поляризація радіальна; густина  $\gamma = 7210$  кг/м<sup>3</sup>; п'єзомодуль  $d_{31} = 134 \cdot 10^{-12}$  К/Н; модуль пружності  $C_{11}^E = 15,1 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>; діелектрична проникливість  $\varepsilon_{33}^s / \varepsilon_0 = 1280$ ;  $e_{31} = d_{31} \cdot C_{33}^E$ . Середній радіус п'єзокерамічного перетворювача приймався типовим для сучасних ГПБА і становив  $r_0 = 0,009$  м при товщині  $h = 0,001$  м. Внутрішній об'єм приймався вакуумованим  $\rho_{\text{вн}} c_{\text{вн}} = 0$ . Параметри зовнішнього середовища приймалися рівними  $\rho = 103$  кг/м<sup>3</sup>;  $c = 1,5 \cdot 10^6$  м/с. Кількість комплексних невідомих, які утримувались при розв'язку нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь (12),

становила 48. При цьому перевірка якості виконання граничних умов та умов спряження на границях областей показала, що нев'язка компонент поля не перевищує 1–5 %.

Результати розрахунків звукового поля ГПБА в присутності морської поверхні наведені на рис. 2 у вигляді характеристик спрямованості в площині, нормальній до поздовжньої осі ГПБА.

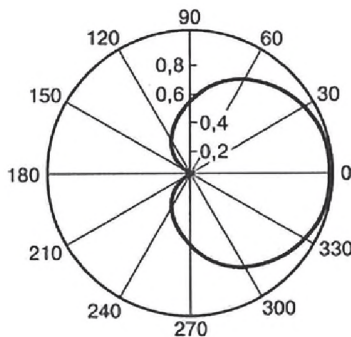


Рис. 2. Характеристика спрямованості звукового поля системи тіл «морська поверхня – ГПБА» в площині, нормальній до поздовжньої осі ГПБА

Ця характеристика є однонаправленою в напрямі моря і має форму кардіоїди. Фізично це обумовлено наступним. Звукове поле ГПБА в присутності морської поверхні являє собою суперпозицію двох звукових полів – поля плоскої морської поверхні і поля ГПБА. Оскільки перше звукове поле є полем, відбитим від акустично «м'якої плоскої» поверхні, то воно відповідає умовам формування гідроакустичного диполя згідно з [5]. Друге звукове поле (поле ГПБА) відповідає умовам формування гідроакустичного пристрою монополя. А оскільки в областях інфразвукових і низьких звукових частот можна рахувати, що морська поверхня і ГПБА розміщені майже в одній площині, то їх сумісна робота і формує гідроакустичну характеристику спрямованості типу «кардіоїди» –  $R(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2}$ . Максимум її маємо в напрямі приходу плоских хвиль ( $\theta = 0$ ), а нульові приймання звукових хвиль – в протилежному напрямку ( $\theta = \pi$ ), що представлено на рис. 1, 2.

## ВИСНОВКИ

Підтверджено, що ГАС з ГПБА є ефективним засобом висвітлення підводної обстановки. Більшість ГАС з ГПБА працюють в області інфразвукових і низьких звукових частот, що обумовлює для таких частот обмежувальні границі у вигляді морської поверхні та морського дна.

З'ясовано їх вплив на роботу ГАС з ГПБА шляхом розв'язання задачі визначення впливу морської поверхні та морського дна окремо.

Також поставлена і розв'язана задача визначення впливу морської поверхні з використанням методу зображень шляхом формулювання розрахункової моделі системи тіл «морська поверхня – ГПБА».

Отримані аналітичні співвідношення, які описують звукові поля, що сформовані морською поверхнею, ГПБА і системою тіл «морська поверхня – ГПБА», шля-

хом розв'язку задачі методами послідовних наближень або редуції нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Застосування отриманих рішень по звукових полях системи тіл «морська поверхня – ГПБА» підтверджено при розрахунку звукових полів розглянутої системи на частоті 20 Гц, з наведенням фізичного обґрунтування отриманих результатів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дерепя А.В., Лейко А.Г., Меленко Ю.Я. Основы военно-технических исследований. Т. 8. Комплексная система «гидроакустическое вооружение – надводный корабль». Проблемные аспекты системы «гидроакустическая станция – надводный корабль» с антеннами переменной глубины: монография. Киев: Изд. дом Д. Бурого. 2016. 400 с.
2. Гузь О.М., Головчан В.Т. Дифракция пружных хвиль в багатозв'язаних тілах: монографія. Київ: Наук. думка. 1972. 254 с.
3. Гузь А.Н., Кубенко В.Д., Бабаев А.Е. Гидроупругость систем оболочек: монография. Киев: Высш. школа. 1984. 208 с.
4. Кубенко В., Янчевський І. Дифракція акустичних хвиль на системах неоднотипних тіл: монографія. Київ: НТУ «Київський політехнічний інст. імені Ігоря Сікорського». 2024. 266 с.
5. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основы акустики: монография. Київ: Наукова думка. 2007. 640 с.
6. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Волновые задачи акустики: монография. Киев: Интерсервис. 2013. 579 с.

## REFERENCES

1. Derepa, A.V., Leiko, A.G. & Melenko, Yu.Ya. (2016), “Kompleksnaia sistema «gidroakusticheskoe vooruzhenie – nadvodnyi korabl». Problemnye aspekty sistemy «gidroakusticheskaia stantsiia – nadvodnyi korabl» z antennami peremennoi glubiny” [Integrated system «hydroacoustic armament – surface ship». Problematic aspects of the system «hydroacoustic station – surface ship» with antennas of variable depth]. K.: D. Buraho Publ. house. 400 p.
2. Huz, O.M. & Holovchan, V.T. (1972), “Dyfraktsiia pruzhnykh khvyl v bahatozviiazanykh tilakh” [Diffraction of elastic waves in multi-bonded bodies]. K.: Nauk. dumka. 254 p.
3. Huz, A.N., Kubenko, V.D. & Babaev, A.E. (1984) “Hydrouprugost system obolochek” [Hydroelasticity of shell systems]. K.: Vyssh. shkola. 208 p.
4. Kubenko, V. & Yanchevskiy, I. (2024) “Dyfraktsiia akustychnykh khvyl na systemakh neodnotypanykh til” [Diffraction of acoustic waves on systems of heterogeneous bodies]. K.: NTU «Kyivskiy politekhnichnyi inst. im. Igora Sikorskogo». 266 p.
5. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsipura, V.T. (2007). “Osnovy akustiky: monografia” [Fundamentals of Acoustics: monograph]. K.: Naukova Dumka. 640 p.
6. Grinchenko, V.T., Vovk, I.V. & Matsipura, V.T. (2013). “Volnovye zadachi akustiki: monografia” [Wave Problems in Acoustics: Monograph]. K.: Interservice. 579 p.

**Leiko O.G., Hamalii N.V., Pozdniakova O.M.,  
Averichev I.V.**

**SOUND FIELDS OF HYDROACOUSTIC  
STATIONS WITH FLEXIBLE EXTENDED  
TOWED ANTENNAS IN THE PRESENCE  
OF THE SEA SURFACE**

*The effectiveness of using hydroacoustic station with flexible extended towed antennas to illuminate the underwater environment largely depends on the presence of limiting boundaries in operating conditions. This is due to the fact that hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas usually operate in the range of infrasonic and low sound frequencies. For them, all seas are limited either by the sea surface or the seabed. The problem of determining the sound fields that form hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in the presence of a limiting boundary in the form of the sea surface is considered. Using the image method, a computational model of the «sea surface-flexible extended towed antennas» body system is formulated. Analytical relations describing the sound fields formed by the sea surface, the flexible extended towed antennas and the «sea surface- flexible extended towed antennas» body system are obtained using the methods of the theory of electrohydroelasticity. Quantitative data for sound fields in the range of infrasonic frequencies are given as an example of the application of the obtained relations. It is shown that the directivity characteristic of the flexible extended towed antennas in the presence of the sea surface has the shape of a cardioid. The physical justification of the obtained results is given. The obtained materials allow us to compare the effectiveness of the use of hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas in deep seas and seas where there is an influence of the sea surface on hydroacoustic stations with flexible extended towed antennas.*

**Keywords:** sound fields, flexible extended towed antenna, sea surface.

**Відомості про авторів:**

**Лейко Олександр Григорович**

доктор технічних наук, професор  
професор кафедри акустичних та мультимедійних  
електронних систем  
Національний технічний  
університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»  
м. Київ, Україна  
<https://orsid.org/0000-0002-5588-6449>  
e-mail: Alexander\_leiko@ukr.net

**Гамалій Наталія Вікторівна**

старший науковий співробітник  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння

та військової техніки Збройних Сил України  
м. Київ, Україна  
<https://orsid.org/0000-0003-1505-854X>

**Позднякова Ольга Миколаївна**

кандидат технічних наук, докторант  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки Збройних Сил України  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>  
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

**Аверічев Ілля Володимирович**

начальник науково-дослідного відділу  
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та  
військової техніки Збройних Сил України  
м. Київ, Україна  
<https://orsid.org/0000-0005-3855-9701>

**Information about the authors:**

**Leiko Oleksandr**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Professor of the Chair  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-5588-6449>  
e-mail: Alexander\_leiko@ukr.net

**Hamalii Nataliia**

Senior Researcher  
Central Scientific Research Institute  
of Armament and Military Equipment  
of Armed Forces of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-1505-854X>

**Pozdniakova Olha**

Candidate of Technical Sciences  
Doctoral Student  
Central Scientific Research Institute  
of Armament and Military Equipment  
of Armed Forces of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-5382-1951>  
e-mail: olpozdnjakova@gmail.com

**Averichev Ilya**

Head of Research Department  
Central Scientific Research Institute  
of Armament and Military Equipment  
of Armed Forces of Ukraine  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0005-3855-9701>

*Стаття надійшла до редколегії 23.01.2026.*

*Стаття прийнята до друку після рецензування 13.02.2026.*

*Стаття опублікована 30.03.2026.*