

УДК 620.179.17

РОЗТАШУВАННЯ ДЖЕРЕЛ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ НА ТОНКОСТІННИХ ОБ'ЄКТАХ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, Є. П. ПОЧАПСЬКИЙ, Б. П. КЛИМ, О. Г. СИМАКОВИЧ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Одержані розв'язки задачі знаходження координат джерел акустичної емісії (АЕ) тонкостінних об'єктів сферичної форми в декартовій системі координат з використанням антени, яка складається з трьох перетворювачів. Розглянуто шляхи усунення неоднозначності визначення місця знаходження джерел пружних хвиль АЕ такою антеною. Одержані результати перевірено за допомогою комп'ютерного моделювання та на реальному сферичному об'єкті. Обчислено похибки вимірювань.

Ключові слова: акустична емісія, локація джерел акустичної емісії, тонкостінний об'єкт сферичної форми, координати джерела.

Актуальність та стан проблеми. Застосування методу акустичної емісії (АЕ) досить поширене для моніторингу зародження і розвитку дефектів в елементах конструкцій, що дає змогу запобігати їх передчасному руйнуванню. Однією з найважливіших складових такого технічного діагностування є виявлення координат місця руйнування, оскільки це дозволяє сконцентрувати обстеження на малій ділянці і тим самим збільшити його достовірність. Дефект, що зароджується або розвивається, випромінює в матеріалі пружні хвилі АЕ. Їх реєстрація дає можливість знайти координати джерела за допомогою акустичної антени первинних перетворювачів, маючи значення різниць часу приходу (РЧП) пружної хвилі на кожен із них. Кількість перетворювачів АЕ (ПАЕ), необхідних для локації джерела, залежить від геометрії об'єкта дослідження, але, як правило, акустична антена має чотири ПАЕ [1].

Відомі праці з визначення координат джерел АЕ на площині [1–8]. Такий підхід можна використати і для локації джерела на малій ділянці сфери, для якої можна знехтувати кривиною. Оскільки похибка обчислень буде зростати зі збільшенням площі, на якій проводиться діагностування, то цей спосіб не є прийнятним для малих об'єктів контролю сферичної форми.

Розглянуто [9] методи локації джерела АЕ на сферичній поверхні, побудовані на використанні наперед визначених схем розташування ПАЕ. Реальні об'єкти контролю через складність конструкції можуть накладати певні обмеження на встановлення п'єзоперетворювачів. Тоді застосовують схеми з довільним розташуванням ПАЕ. Для цього необхідно мати відповідну методіку розрахунку координат джерела АЕ, а також ураховувати можливі вироджені випадки і проаналізувати їх для розроблення алгоритму випробувань.

Розглянуто [10–13] задачі з визначення координат джерела АЕ на сферичній поверхні. Для їх розв'язання використано модифіковану полярну систему координат, що введена на поверхні сфери. Одержані розв'язки не враховують всі можливі варіанти розташування ПАЕ та джерела. В розглянутих варіантах присутня неоднозначність визначення координат джерела і не вказані шляхи її усунення. Подібна проблема виникає під час розв'язання аналогічних задач для об'єкта циліндричної форми [14].

Контактна особа: В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, e-mail: skal@ipm.lviv.ua

Відомо також, що під час локації джерел необхідно враховувати похибку вимірювання, тому розв'язок системи рівнянь має бути якомога стійкішим. Важливою відмінністю запропонованого підходу від відомих є відсутність тригонометричних функцій під час обчислень (не враховуючи тих, що можуть бути визначені до початку експерименту під час встановлення ПАЕ), які є досить складними для розрахунку на комп'ютері. Це дає змогу звільнити ресурси процесора і використати їх для інших задач.

Мета дослідження – розв'язати задачу визначення координат дефектів, що виникають в об'єктах сферичної форми, та побудувати методики для їх технічного діагностування.

Умови задачі такі. Об'єкт має малу товщину стінки порівняно з його радіусом; перетворювачі АЕ розміщені тільки на поверхні сфери.

Розроблення теоретичних засад методу діагностування об'єктів сферичної форми. У загальному випадку час поширення хвилі від джерела до ПАЕ обчислюють за формулою

$$\frac{dist(\vec{r}, \vec{r}_i)}{c} = t_i, \quad (1)$$

де $dist(\vec{r}, \vec{r}_i)$ – відстань між джерелом з радіус-вектором $\vec{r} = (x, y, z)$ та i -им ПАЕ з радіус-вектором $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$; c – швидкість поширення пружної хвилі; t_i – час її поширення від джерела до i -го ПАЕ.

Для тонкостінної сфери залежність, за якою визначають відстань до ПАЕ, можна подати так:

$$dist(\vec{r}, \vec{r}_i) = R \cdot \arccos\left(\frac{\vec{r} \cdot \vec{r}_i}{|\vec{r}| |\vec{r}_i|}\right), \quad (2)$$

де R – радіус сфери, а довжини векторів дорівнюють $|\vec{r}| = |\vec{r}_i| = R$.

Запишемо систему рівнянь для визначення відстаней до джерела для трьох ПАЕ:

$$\begin{cases} dist(\vec{r}, \vec{r}_0) = ct_0; \\ dist(\vec{r}, \vec{r}_1) = ct_1; \\ dist(\vec{r}, \vec{r}_2) = ct_2. \end{cases} \quad (3)$$

Підставивши в систему (3) вираз (2), одержимо:

$$\begin{cases} \vec{r} \cdot \vec{r}_0' = \cos(c'(t_0 + \Delta t_{00})); \\ \vec{r} \cdot \vec{r}_1' = \cos(c'(t_0 + \Delta t_{01})); \\ \vec{r} \cdot \vec{r}_2' = \cos(c'(t_0 + \Delta t_{02})). \end{cases} \quad (4)$$

Тут $c' = c/R$, $\vec{r}_i' = \vec{r}_i/R = (x_i', y_i', z_i')$, $t_i = t_0 + \Delta t_{0i}$, де Δt_{0i} – РЧП хвилі на найближчий (нульовий) та наступний i -ий ПАЕ (очевидно, що $|\vec{r}_i'| = 1$, а $\Delta t_{00} = 0$).

Розкриємо тригонометричні функції системи рівнянь (4) у вигляді

$$\begin{cases} \vec{r} \cdot \vec{r}_0' = \cos(c't_0); \\ \vec{r} \cdot \vec{r}_1' = \cos(c't_0)\cos(c'\Delta t_{01}) - \sin(c't_0)\sin(c'\Delta t_{01}); \\ \vec{r} \cdot \vec{r}_2' = \cos(c't_0)\cos(c'\Delta t_{02}) - \sin(c't_0)\sin(c'\Delta t_{02}) \end{cases} \quad (5)$$

та підставимо перше рівняння в два наступні, зауваживши, що $\sin(c't_0) = \sqrt{1 - (\vec{r} \cdot \vec{r}_0')^2}$ і ввівши позначення $\cos(c'\Delta t_{0i}) = c_i$, $\sin(c'\Delta t_{0i}) = s_i$. Отримаємо:

$$\begin{cases} \vec{r} \cdot \vec{r}_1' = c_1(\vec{r} \cdot \vec{r}_0') - s_1\sqrt{1 - (\vec{r} \cdot \vec{r}_0')^2}; \\ \vec{r} \cdot \vec{r}_2' = c_2(\vec{r} \cdot \vec{r}_0') - s_2\sqrt{1 - (\vec{r} \cdot \vec{r}_0')^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Для спрощення системи (6) повернемо систему координат послідовно на кути $\beta = \arctg(z_0/x_0)$ і $\gamma = \arctg(y_0/\sqrt{z_0^2 + x_0^2})$ навколо осей Oy і Oz , відповідно. У результаті цього радіус-вектор для нульового ПАЕ збіжиться з віссю абсцис Ox . У новій системі координат для радіус-векторів ПАЕ одержуємо:

$$\vec{r}_i'' = A_z \cdot (A_y \cdot \vec{r}_i'), \quad (7)$$

де $i = 0, 1, 2$, а A_y і A_z – матриці повороту, які дорівнюють

$$A_y = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}, \quad A_z = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

та $\vec{r}_0'' = (1, 0, 0)$.

Повертаючи нову систему координат навколо осі Ox на кут $\beta = \arctg(z_1'''/y_1''')$, можна отримати радіус-вектор для першого ПАЕ з нульовою координатою z . В одержаній системі координат радіус-вектори ПАЕ дорівнюють

$$\vec{r}_i''' = A_x \cdot \vec{r}_i'' = A_x \cdot (A_z \cdot (A_y \cdot \vec{r}_i')), \quad (9)$$

де $i = 0, 1, 2$, а матриця повороту A_x буде

$$A_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Тоді система рівнянь (6) набуде вигляду

$$\begin{cases} x''' x_1''' + y''' y_1''' = c_1 x''' - s_1 \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ x''' x_2''' + y''' y_2''' + z''' z_2''' = c_2 x''' - s_2 \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ (x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Розглянемо випадок, коли $y_1''' \neq 0$. Помножимо перше рівняння системи (11) на y_2'''/y_1''' та віднімемо від другого. Отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} x''' x_{11} + y''' y_{11} = c_{11} x''' - s_{11} \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ x''' x_{21} + z''' z_{21} = c_{21} x''' - s_{21} \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ (x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1, \end{cases} \quad (12)$$

де $x_{11} = x_1'''$, $y_{11} = y_1'''$, $c_{11} = c_1$, $s_{11} = s_1$, $x_{21} = x_2''' - y_2''' x_1'''/y_1'''$, $z_{21} = z_2'''$, $c_{21} = c_2 - c_1 y_2'''/y_1'''$, $s_{21} = s_2 - s_1 y_2'''/y_1'''$. Для $z_{21} \neq 0$ перенесемо доданки з x у праву сторону. Тоді

$$\begin{cases} y''' = x_{1y} x''' - s_{1y} \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ z''' = x_{2z} x''' - s_{2z} \sqrt{1 - (x''')^2}; \\ (x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1. \end{cases} \quad (13)$$

Тут $x_{1y} = (c_{11} - x_{11})/y_{11}$, $s_{1y} = s_{11}/y_{11}$, $x_{2z} = (c_{21} - x_{21})/z_{21}$, $s_{2z} = s_{21}/z_{21}$. Підставимо перше і друге рівняння системи (13) в останнє, розкриємо дужки та згрупуємо. Отримаємо рівняння

$$x_{32}(x''')^2 + x_{33}x'''\sqrt{1-(x''')^2} + x_{30} = 0, \quad (14)$$

де $x_{32} = 1 + x_{1y}^2 - s_{1y}^2 + x_{2z}^2 - s_{1z}^2$, $x_{33} = -2x_{1y}s_{1y} - 2x_{2z}s_{2z}$, $x_{30} = s_{1y}^2 + s_{2z}^2 - 1$. Воно має чотири розв'язки:

$$x_{1\dots 4}''' = \pm\sqrt{x_{41} \pm x_{42}} / x_{43}, \quad (15)$$

де $x_{41} = -2x_{30}x_{32} + x_{33}^2$, $x_{42} = x_{33}\sqrt{x_{33}^2 - 4x_{30}x_{32} - 4x_{30}^2}$, $x_{43} = \sqrt{(x_{32}^2 + x_{33}^2)/2}$.

Підставивши значення x''' у перше і друге рівняння системи (13), знайдемо координати y''' і z''' джерела АЕ.

Якщо ж $z_{21} = 0$, то система (12) набуде вигляду

$$\begin{cases} x'''x_{11} + y'''y_{11} = c_{11}x''' - s_{11}\sqrt{1-(x''')^2}; \\ x'''x_{21} = c_{21}x''' - s_{21}\sqrt{1-(x''')^2}; \\ (x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1. \end{cases} \quad (16)$$

З другого рівняння системи (16) одержимо:

$$x''' = \frac{\pm s_{21}}{\sqrt{(x_{21} - c_{21})^2 + s_{21}^2}}. \quad (17)$$

При цьому знак “-” буде для $x_{21} > c_{21}$, а коли $x_{21} = c_{21}$, то $x''' = \pm 1$.

Якщо $y_1''' = 0$, то систему (11) можна записати так:

$$\begin{cases} x'''x_1''' = c_1x''' - s_1\sqrt{1-(x''')^2}; \\ x'''x_2''' + y'''y_2''' + z'''z_2''' = c_2x''' - s_2\sqrt{1-(x''')^2}; \\ (x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1. \end{cases} \quad (18)$$

З першого рівняння системи (18) одержимо:

$$x''' = \frac{\pm s_1}{\sqrt{(x_1''' - c_1)^2 + s_1^2}}. \quad (19)$$

При цьому знак “-” буде для $x_1''' > c_1$, а коли $x_1''' = c_1$, то $x''' = \pm 1$. Значення y''' можна знайти з другого рівняння системи (18). Підставивши x''' і y''' у третє рівняння, знаходимо два значення компоненти z''' . Отже, маємо всього чотири розв'язки.

Після знаходження координат радіус-вектора \vec{r}''' для джерела АЕ, необхідно повернутись у початкову систему координат

$$\vec{r} = R \cdot A_y^T \cdot (A_z^T \cdot (A_x^T \cdot \vec{r}''')), \quad (20)$$

де A_x^T, A_y^T, A_z^T – транспоновані матриці повороту, які дорівнюють відповідним оберненим матрицям.

Перевірка результатів математичного моделювання. Отримана група розв'язків складається з двох підгруп: перша лежить на поверхні одиничної сфери з центром у початку координат, а інша – на ще одній сфері, що також побудована для заданих ПАЕ. Для того, щоб визначити, які розв'язки належать заданій сфері, використовуємо умову

$$(x''')^2 + (y''')^2 + (z''')^2 = 1. \quad (21)$$

Для визначення коректного розв'язку з тих, що задовольняють співвідношення (21), необхідний хоча б один додатковий ПАЕ. Тоді сума квадратів різниць розрахункових та фактичних РЧП на додаткові ПАЕ є меншою

$$\sum_{i=3}^{N-1} \left(\frac{\text{dist}(\vec{r}''', \vec{r}_i''')}{c'} - \frac{\text{dist}(\vec{r}''', \vec{r}_0''')}{c'} - \Delta t_{0i} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (22)$$

де N – кількість ПАЕ.

Перед експериментальними випробуваннями на реальному сферичному об'єкті виконали віртуальний експеримент, який підтвердив коректність отриманих формул. Алгоритм тестування складався з таких кроків: задання координат трьох ПАЕ на поверхні сфери; задання координат джерела АЕ; обчислення РЧП сигналу АЕ від джерела до першого та інших ПАЕ (пряма задача); знаходження координат джерела АЕ за координатами ПАЕ та РЧП (обернена задача); порівняння заданого і знайденого положення джерела для визначення похибки обчислень.

Розташовували ПАЕ на поверхні одичної сфери з кроком 1° за довготою та широтою. Проте прямий перебір можливих розташувань дає дуже велику кількість ($\sim 10^9$) варіантів, більшість з яких тотожні. Тому координати ρ, θ, φ (відстань до початку координат, зенітний і азимутальний кути, відповідно) ПАЕ в сферичній системі координат задавали за таким правилом:

$$S_1 = (1, 0, 0), \quad S_2 = \left(1, \frac{\pi i}{180}, 0\right), \quad S_3 = \left(1, \frac{\pi j}{180}, \frac{\pi k}{180}\right), \quad i, j, k = 0, \dots, 180. \quad (23)$$

Це скоротило кількість варіантів до $\sim 6 \cdot 10^6$. Координати джерел АЕ задавали з кроком 2° по всій сфері за правилом

$$S = \left(1, \frac{\pi i}{90}, \frac{\pi j}{90}\right), \quad i = 0, \dots, 90, \quad j = 0, \dots, 180. \quad (24)$$

Отже, для повного перебору отримали $\sim 10^{11}$ випадків. Така кількість є досить велика і потребує значного часу для обчислень. Тому, щоб пришвидшити виконання тесту використали динамічне програмування: для заданих РЧП обчислювали координати джерела, результат запам'ятовували в масиві, а наступні РЧП порівнювали з уже обчисленими. Якщо є розв'язок, то брали результат з масиву, якщо ні, то обчислювали і заносили до таблиці. Результати тестування показали незначну похибку визначення координат, фактично обумовлену обмеженою розрядністю подання чисел у комп'ютері.

Вимірювання та їх результати. Для перевірки одержаних результатів використовували ненавантажений внутрішнім тиском об'єкт контролю сферичної форми (рис. 1). Його параметри: радіус – 0,207 м, товщина стінки – 0,002 м, матеріал – дюралюміній. Швидкість поширення хвилі визначили експериментально і порівняли з табличними даними. Вимірювали модернізованою портативною восьмиканальною вимірювальною АЕ-системою SKOP-8M [15]. Вона забезпечує виявлення, виділення та реєстрацію сигналів АЕ на восьми вимірювальних каналах з подальшим збереженням їх у пам'ять персонального комп'ютера для необхідного опрацювання отриманих даних та їх візуалізації в реальному масштабі часу.

Для досліджень використовували квазірезонансні ПАЕ з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 dB. Перед початком робіт налаштовували АЕ-систему SKOP-8M: кількість вимірювальних каналів – 8 (підсилення кожного 40 dB); тривалість вибірки – 2 ms; період дискретизації аналогового сигналу – 0,5 μ s; частота зрізу фільтра низьких

частот – 600 kHz; високих частот – 200 kHz; поріг дискримінації – 23 %; рівень власних шумів, приведений до входу попереднього підсилювача – 7 μV . Розташування ПАЕ на об'єкті показано на рис. 2 і в табл. 1.

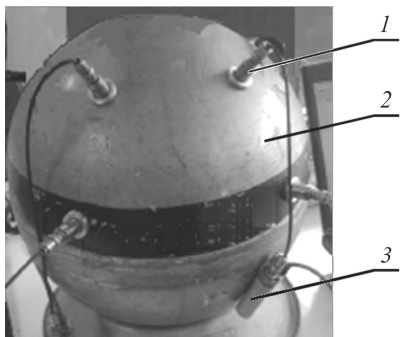


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Загальний вигляд об'єкта контролю сферичної форми:
1 – ПАЕ; 2 – об'єкт контролю; 3 – попередній підсилювач.

Fig. 1. General outline of a tested spherical object:
1 – AE sensor; 2 – spherical object; 3 – pre-amplifier.

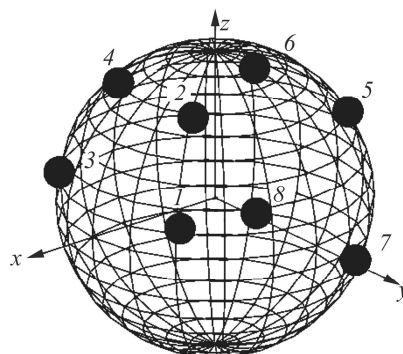


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Схема розташування ПАЕ (1–8) на об'єкті контролю.

Fig. 2. Scheme of AE sensors location (1–8) on a tested spherical object.

Таблиця 1. Координати місць розташування ПАЕ, що утворюють п'єзоантену

№ місця встановлення ПАЕ	θ	φ	x	y	z
	rad		m		
1	0,92	0,65	0,100	0,076	0,164
2	0,92	-0,65	0,100	-0,076	0,164
3	0,19	0,65	0,161	0,123	0,040
4	0,19	-0,65	0,161	-0,123	0,040
5	0,58	2,56	-0,145	0,095	0,113
6	0,58	-2,56	-0,145	-0,095	0,113
7	-0,48	2,56	-0,153	0,101	-0,096
8	-0,48	-2,56	-0,153	-0,101	-0,096

Пружну хвилю АЕ збуджували за допомогою зонда-імітатора системи SKOP-8M. Частотний діапазон імітаційного імпульсу відповідав частотному діапазону вимірювального каналу системи АЕ-контролю. Також використовували джерело Гсу [16] (злам графітового стрижня діаметром 0,5 mm, твердістю 2Т або 2Н) у тих місцях, де неможливо надійно встановити п'єзоелектричний перетворювач зонда-імітатора. Під час імітації джерел АЕ отримали сигнали, типовий вигляд яких показаний на рис. 3. Як бачимо, РЧП сигналу для різних каналів добре виділяються на акустограмах.

Наведені (табл. 2) результати обчислення координат джерел АЕ за отриманими розв'язками. Абсолютну похибку знаходили за формулою

$$\Delta = \text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_e), \quad (25)$$

де \vec{r} – радіус-вектор заданого джерела АЕ; \vec{r}_e – радіус-вектор джерела АЕ, отриманого за допомогою системи SKOP-8M. Відносну похибку шукали за виразом [17]

$$\delta = \Delta / r_b \cdot 100\% , \quad (26)$$

де $r_b = 0,151$ м – мінімальна відстань між ПАЕ (база вимірювань).

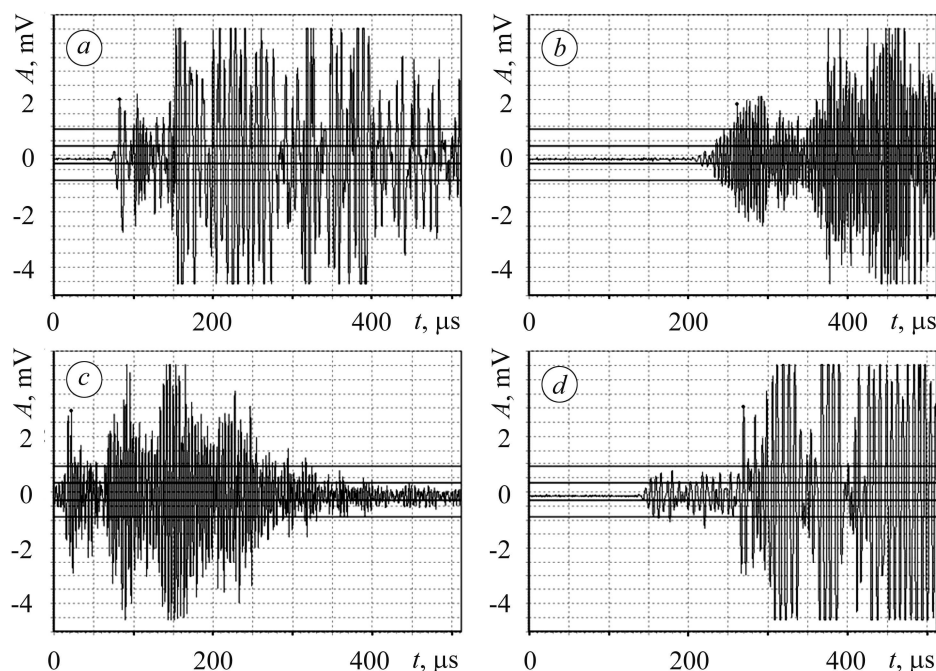


Рис. 3. Типовий вигляд сигналу АЕ, зареєстрованого чотирма каналами системи SKOP-8M: *a* – перший, *b* – другий, *c* – третій, *d* – четвертий.

Fig. 3. Acoustic emission signal, obtained by using the SKOP-8M system with four sensors: *a* – first; *b* – second; *c* – third; *d* – fourth.

Таблиця 2. Результати випробувань

Тип джерела	Координати (θ, φ, x, y, z)		Δ , mm	δ , %
	Реальні	Отримані		
Гсу	(0,65;0,10;0,164;0,016;0,125)	(0,66;0,11;0,163;0,018;0,127)	3	1,9
Імітатор	(-0,50;-0,50;0,159;-0,087;-0,099)	(-0,516;-0,502;0,158;-0,087;-0,102)	3	2,2
Гсу	(1,00;1,00;0,060;0,094;0,174)	(1,01;0,99;0,060;0,092;0,175)	3	1,9
Імітатор	(-1,00;1,00;0,060;0,094;-0,174)	(-0,983;0,99;0,063;0,096;-0,172)	4	2,7
Гсу	(2,00;0,15;-0,085;-0,013;0,188)	(1,99;0,13;-0,084;-0,011;0,189)	5	3,1

ВИСНОВКИ

Отримані внаслідок математичного моделювання формули для визначення координат джерела АЕ на поверхні тонкостінного сферичного об'єкта контролю підтвердили добру збіжність результатів числового розрахунку і експериментів. Віртуальний комп'ютерний експеримент продемонстрував високу точність отриманих розв'язків для довільної п'єзоантени. Мінімальна кількість ПАЕ, за якою можна однозначно визначити координати джерела АЕ, дорівнює чотирьом. Фізичний експеримент на сферичному об'єкті підтвердив можливість застосування розробленої методики в реальних умовах діагностування.

РЕЗЮМЕ. Получены решения задачи нахождения координат источников акустической эмиссии (АЭ) тонкостенных объектов сферической формы в декартовой системе ко-

ординат с использованием антенны, которая состоит из трех преобразователей. Рассмотрены пути устранения неоднозначности определения местоположения источников упругих волн АЭ такой антенной. Полученные результаты проверены с помощью компьютерного моделирования и на реальном сферическом объекте. Вычислены погрешности измерений.

SUMMARY. Solutions of the problem of finding coordinates of acoustic emission (AE) signals location of thin-walled spherical objects were obtained in cartesian coordinate system, using antennas consisting of three transducers. The way of removal of ambiguous determination of AE elastic waves sources location by such antenna are considered. The obtained results were checked by computer modeling and on a real spherical object. The measurement errors were calculated.

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. посіб.: у 3 т. – К.: Наук. думка, 2009. – 2. – 264 с.
2. Андрейків О. С., Скальський В. Р., Сулим Г. Т. Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування: Монографія. – Львів: Сполом, 2007. – 480 с.
3. Степанова Л. Н., Лебедев Е. Ю., Кабанов С. И. Локализация сигналов АЭ при прочностных испытаниях конструкций с использованием пьезоантенны произвольной формы // Дефектоскопия. – 1999. – № 9. – С. 47–54.
4. Красильников Д. П., Никельсон А. Л., Шемякин В. В. Локализация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – К.: Наук. думка, 1985. – В. 1. – С. 51–52.
5. Summerscales J. Acoustic emission source location in fibre-reinforced composite materials. – Plymouth: Advanced Composites Manufacturing Centre, 2013. – 32 p.
6. Research on Acoustic Emission In-Service Inspection for Large Above-Ground Storage Tank Floors / Mingchun Lin, Yewei Kang, Weibin Wang et al. // 8th Int. Pipeline Conf. – 2010. – Vol. 3. – P. 233–239.
7. Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array / D. Aljets, A. Chong, S. Wilcox, K. Holford // J. Acoustic Emission. – 2010. – Vol. 28. – P. 85–98.
8. Novel acoustic emission source location / R. Pullin, M. Baxter, M. Eaton et al. // Ibid. – 2007. – Vol. 25. – P. 215–223.
9. Бабак В. П., Филоненко С. Ф., Галайчук Г. Л. Локация источников развивающихся дефектов с использованием метода акустической эмиссии // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2. – С. 15–20.
10. Asty M. Acoustic emission source location on a spherical or plane surface // NDT Intern. – 1978. – Vol. II, № 5. – P. 223–226.
11. Kappatos V., Lympertos E., and Dermatas E. Estimation of the best sensors position for the minimum error location of acoustic emission sources on spherical surfaces // 3rd Int. Conf. on Non-Destructive Testing of the Hellenic Society for NDT. – 2003. – P. 123–128.
12. Tobias A. Acoustic-Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three Sensors // Non-Destructive Testing. – 1976. – Vol. 9, №. 1. – P. 9–12.
13. Burenko O. and Whittaker J. W. Acoustic Emission Point Source Location on Thin Spherical Shell // Proc. IEEE Southeastcon. – 1987. – Vol. 2. – P. 546–552.
14. Lympertos E. and Dermatas E. Best sensors position for accurate location of acoustic emission sources on cylindrical surfaces // ICCES (Int. Conf. on Computational & Experimental Engng. and Sci.). – 2003. – P. 123–128.
15. Портативна система SKOP-8M для вимірювання та аналізу сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, Б. П. Клим, Є. П. Почапський та ін. // Наука та інновації. – 2010. – 6(3). – С. 20–29.
16. USA Patent 4018084. Acoustic emission simulator, assigned to Lockheed Aircraft Corporation / N. Hsu. – 13 May, 1976.
17. ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 26 с.

Одержано 20.05.2014