

ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ У ТОНКОСТІННИХ ОБ'ЄКТАХ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

A method for location AE source in cylindrical shell was considered in this paper. The solution of corresponding problem was presented and checked by computer modelling. Minimum number of AE sensors needed for location source was found. The method approved by physical experiment.

Keywords: *acoustic emission, source location, nondestructive testing, cylindrical shell.*

На підставі розв'язку математичної задачі побудовано відповідну методику знаходження координат джерел акустичної емісії (АЕ) в тонкостінних об'єктах циліндричної форми. Визначено мінімальну кількість перетворювачів АЕ, необхідних для цього. Розроблені теоретичні положення перевірено шляхом комп'ютерного моделювання та за результатами експериментальних випробувань на циліндричному об'єкті в лабораторних умовах.

Ключові слова: *акустична емісія, неруйнівний контроль, локація джерела, циліндрична емність.*

Актуальність та стан проблеми. Застосування методу АЕ досить поширене для моніторингу зародження і розвитку дефектів в елементах конструкцій, що дає змогу запобігати їх передчасному катастрофічному руйнуванню [1, 3]. Однією з найважливіших складових методик технічного АЕ діагностування є виявлення координат місця руйнування, оскільки це дає можливість сконцентрувати обстеження на малій ділянці і тим самим збільшити його достовірність. Локацію здійснюють за допомогою акустичної антени первинних перетворювачів, маючи значення різниць часу приходу (РЧП) пружної хвилі АЕ на кожен із них. Кількість первинних перетворювачів АЕ (ПАЕ), необхідних для цього, залежить від геометрії об'єкта дослідження, але, здебільшого, акустична антена має 4 ПАЕ [3].

У працях [5–7] описані методи визначення координат джерел АЕ на площині. Такий підхід може бути використаний для їх локації на невеликій частині циліндричної поверхні. Для використання відомих методів необхідно використовувати розгортку циліндра, де кутова координата відповідає осі абсцис, а координата висоти циліндра – осі ординат.

У працях [8–11, 13, 14] подано методи локації джерел у циліндричних зразках. Розглянуто задачу для частини тонкостінного циліндра [11]. Запропонований підхід не враховує всі можливі шляхи поширення хвилі АЕ від джерела до ПАЕ. Адже під час розгляду всього циліндричного об'єкта хвиля АЕ рухається в обох напрямках (додатному і від'ємному) відліку кутової координати, що призводить до виникнення додаткових розв'язків.

Автори [13] розглянули задачу локації джерела АЕ в тонкостінному циліндрі для загального випадку. З метою усунення неоднозначності у відліку кутової координати вони вводять поняття віртуальних ПАЕ, які дають змогу отримати коректний результат. Вказаний метод потребує повного перебору всіх можливих трійок ПАЕ (реальних і віртуальних), чим збільшує кількість операцій і ускладнює алгоритм. Також поданий розв'язок задачі для трьох ПАЕ не враховує всіх можливих випадків, в тому числі і вироджених.

У [14] отримали формули для локації джерела АЕ у тонкостінному циліндрі лише для наперед визначеного розташування ПАЕ, що дещо звужує їх застосування на практиці.

Мета досліджень – розроблення методики локації джерела АЕ у тонкостінному об’єкті контролю циліндричної форми незалежно від геометрії розташування ПАЕ, а також визначення мінімальної їх кількості, необхідної для однозначного знаходження координат.

Постановка задачі та її аналітичний розв’язок. Час поширення пружної хвилі від джерела АЕ до ПАЕ можна обчислити за формулою

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

де \vec{r} – радіус-вектор джерела; \vec{r}_i – радіус-вектор i -го ПАЕ; c – швидкість поширення хвилі; t_i – час проходження хвилі на i -ий ПАЕ; $\text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_i)$ – відстань між точками, що описуються відповідними радіус-векторами, яку проходить хвиля АЕ.

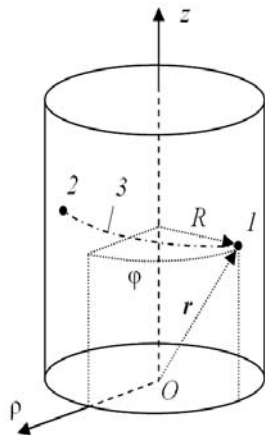


Рис. 1. Схема розташування ПАЕ і джерела АЕ на циліндричному об’єкті у циліндричній системі координат: 1 – джерело АЕ; 2 – ПАЕ; 3 – найкоротший шлях проходження пружної хвилі від джерела до ПАЕ.

Запишемо систему рівнянь для визначення координат джерела АЕ за допомогою трьох ПАЕ:

$$\begin{cases} \text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_0) = ct_0; \\ \text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_1) = ct_1; \\ \text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_2) = ct_2. \end{cases} \quad (2)$$

Формула відстані у циліндричній системі координат (ρ, φ, z) матиме такий вигляд:

$$\text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_i) = \sqrt{R^2 \cdot (\Delta\varphi_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (3)$$

де $\Delta\varphi_i = \varphi - \varphi_i$ – мінімальна різниця кутів координат джерела та i -го ПАЕ. Підставимо (3) в систему (2) і отримаємо:

$$\begin{cases} \sqrt{R^2 \cdot (\Delta\varphi_0)^2 + (z - z_0)^2} = ct_0; \\ \sqrt{R^2 \cdot (\Delta\varphi_1)^2 + (z - z_1)^2} = ct_1; \\ \sqrt{R^2 \cdot (\Delta\varphi_2)^2 + (z - z_2)^2} = ct_2. \end{cases} \quad (4)$$

Винесемо R за знак кореня і розділимо на нього обидві частини рівнянь ($R \neq 0$) і введемо позначення $c' = c/R$, $h = z/R$. Тоді система (4) набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} \sqrt{(\Delta\varphi_0)^2 + (h - h_0)^2} = c't_0; \\ \sqrt{(\Delta\varphi_1)^2 + (h - h_1)^2} = c't_1; \\ \sqrt{(\Delta\varphi_2)^2 + (h - h_2)^2} = c't_2. \end{cases} \quad (5)$$

Також подамо значення часу t_i у вигляді суми часу приходу сигналу до першого ПАЕ і різниці часів приходу між першим ПАЕ та i -им $t_i = t_0 + \Delta t_{0i}$ ($\Delta t_{00} = 0$):

$$\begin{cases} \sqrt{(\Delta\varphi_0)^2 + (h - h_0)^2} = c't_0; \\ \sqrt{(\Delta\varphi_1)^2 + (h - h_1)^2} = c't_0 + c'\Delta t_{01}; \\ \sqrt{(\Delta\varphi_2)^2 + (h - h_2)^2} = c't_0 + c'\Delta t_{02}. \end{cases} \quad (6)$$

Підставимо перше рівняння системи (6) у друге і третє. Тоді отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \sqrt{(\Delta\varphi_1)^2 + (h-h_1)^2} = \sqrt{(\Delta\varphi_0)^2 + (h-h_0)^2} + c'\Delta t_{01}; \\ \sqrt{(\Delta\varphi_2)^2 + (h-h_2)^2} = \sqrt{(\Delta\varphi_0)^2 + (h-h_0)^2} + c'\Delta t_{02}. \end{cases} \quad (7)$$

Повернемося до подання $\Delta\varphi_i$. На рис. 2 показано два випадки, які демонструють проблему задання кутової координати ПАЕ. У випадку рис. 2а напрям хвилі АЕ від джерела \vec{r} до другого ПАЕ \vec{r}_2 є додатним з відповідними кутовими координатами: $\varphi = 170^\circ$, $\varphi_1 = 60^\circ$, $\varphi_2 = 300^\circ$, а для випадку рис. 2б напрям хвилі від \vec{r} до \vec{r}_2 є від'ємним, тому координату \vec{r}_2 запишемо так: $\varphi = -30^\circ$, $\varphi_1 = 60^\circ$, $\varphi_2 = -60^\circ$. Оскільки ми наперед не знаємо, за яким напрямом відліку кута (додатним чи від'ємним) прийде хвиля до кожного з ПАЕ [13], то необхідно розглянути кожен випадок окремо.

За випробувань у реальному часі велика кількість операцій може бути критичною, тому розглянемо, як можна її зменшити. Для спрощення виразу (7) перенесемо систему координат таким чином, щоб положення нульового ПАЕ мало координати $\vec{r} = (R, 0, 0)$:

$$x_i = \varphi_i - \varphi_0; \quad y_i = h_i - h_0; \quad (i = \overline{0,2}), \quad (8)$$

де x_i – кутова координата i -го ПАЕ в нововведеній системі координат; y_i – координата висоти i -го ПАЕ.

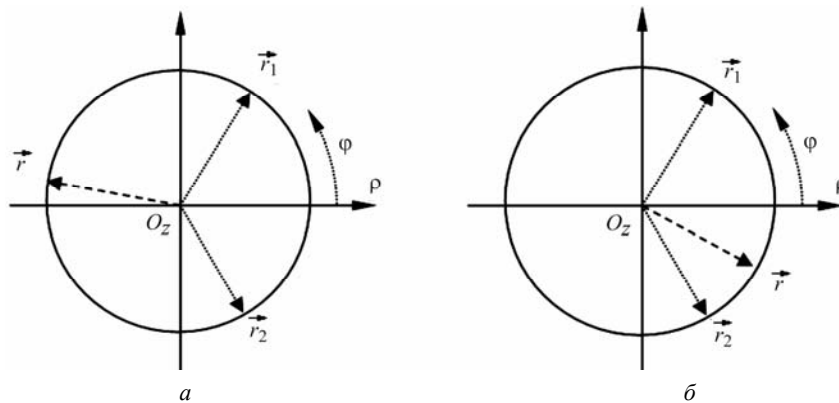


Рис. 2. Проекція контура циліндричного об'єкта контролю, двох ПАЕ і джерела АЕ на площину $z = 0$: а – поширення хвилі АЕ до другого ПАЕ за додатним напрямом кута; б – від'ємним.

Очевидно, що у введеної системі координат $x_0 \equiv 0$, тому невідома координата джерела АЕ буде лежати в межах $x \in [-\pi, \pi)$, а оскільки хвиля від джерела АЕ прямує до ПАЕ найкоротшим шляхом, то вона не може пройти більше, ніж півкола. З тих самих міркувань діапазон кутових координат інших ПАЕ належить проміжку $x_i \in (-2\pi, 2\pi)$, $i = 1, 2$. У цьому діапазоні координати i -го ПАЕ можуть бути визначені як $x_i \in (-2\pi, 0)$ або як $x_i \in (0, -2\pi)$. Максимальна кількість можливих комбінацій з урахуванням можливостей поширення хвилі в обох напрямках відліку кута буде рівна чотирьом:

$$\begin{aligned} x_1 &= \min(\varphi - \varphi_1 - 2\pi; \varphi - \varphi_1); & x_2 &= \min(\varphi - \varphi_2 - 2\pi; \varphi - \varphi_2); \\ x_1 &= \min(\varphi - \varphi_1 - 2\pi; \varphi - \varphi_1); & x_2 &= \max(\varphi - \varphi_2; \varphi - \varphi_2 + 2\pi); \\ x_1 &= \max(\varphi - \varphi_1; \varphi - \varphi_1 + 2\pi); & x_2 &= \min(\varphi - \varphi_2 - 2\pi; \varphi - \varphi_2); \\ x_1 &= \max(\varphi - \varphi_1; \varphi - \varphi_1 + 2\pi); & x_2 &= \max(\varphi - \varphi_2; \varphi - \varphi_2 + 2\pi). \end{aligned} \quad (9)$$

Також врахуємо, що відстань між x_1 і x_2 не може бути більшою за 2π , інакше це означало б, що хвиля АЕ змогла оминати ПАЕ один раз і була зареєстрованою ним під час проходження повного кола. Така ситуація фізично неможлива.

Отже, не зменшуючи загальності, приймемо

$$\Delta\varphi_i = x - x_i. \quad (10)$$

Підставимо вираз (7) в систему рівнянь (8) з урахуванням (10):

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} = \sqrt{x^2 + y^2} + c'\Delta t_{01}; \\ \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} = \sqrt{x^2 + y^2} + c'\Delta t_{02}. \end{cases} \quad (11)$$

Піднісши до квадрату праву і ліву частини i -го рівняння системи (11), отримаємо:

$$(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 = x^2 + y^2 + 2\sqrt{x^2 + y^2} c'\Delta t_{0i} + (c'\Delta t_{0i})^2. \quad (12)$$

Зауважимо, що жоден вираз по різні сторони рівності не може бути від'ємним. Це означає, що під час подальшого розв'язання зайві корені не виникнуть. Розкривши дужки рівняння (12) та перенісши сталі доданки з правої частини у ліву, а також розділивши обидві частини рівняння на -2 , можемо записати

$$x_i x + y_i y + ((c'\Delta t_{0i})^2 - x_i^2 - y_i^2)/2 = -c'\Delta t_{0i} \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (13)$$

Введемо позначення

$$c_{1i} = ((c'\Delta t_{0i})^2 - x_i^2 - y_i^2)/2; \quad c_{2i} = -c'\Delta t_{0i}. \quad (14)$$

Тоді рівняння (13) набуде такого вигляду:

$$x_i x + y_i y + c_{1i} = c_{2i} \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (15)$$

Очевидно, що $c_{1i} \leq 0$ і $c_{2i} \leq 0$. Для того, щоб визначити геометричний зміст рівняння (15), розглянемо його праву $z = c_{2i} \sqrt{x^2 + y^2}$ (конус) і ліву $z = x_i x + y_i y + c_{1i}$ (площина) частини. Перетином вказаних фігур є крива другого порядку. Остаточно система рівнянь (11) буде виглядати так:

$$\begin{cases} x_1 x + y_1 y + c_{11} = c_{21} \sqrt{x^2 + y^2}; \\ x_2 x + y_2 y + c_{12} = c_{22} \sqrt{x^2 + y^2}. \end{cases} \quad (16)$$

Її розв'язком є точки перетину кривих другого порядку, в тому числі і вироджених. Подальші дії залежать від значень c_{2i} , тому розглянемо також кожен випадок окремо.

Якщо $c_{21} = 0$ і $c_{22} = 0$, тоді систему рівнянь можна подати так:

$$\begin{cases} x_1 x + y_1 y + c_{11} = 0; \\ x_2 x + y_2 y + c_{12} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Вона описує перетин двох прямих і має єдиний розв'язок:

$$y = (c_{12}x_1 - c_{11}x_2)/(y_1x_2 - y_2x_1); \quad x = (c_{11}y_2 - c_{12}y_1)/(y_1x_2 - y_2x_1). \quad (18)$$

Розглянемо випадок, коли $y_1x_2 - y_2x_1 = 0$, що рівносильно

$$y_1x_2 = y_2x_1; \quad \frac{y_1}{x_1} = \frac{y_2}{x_2} = k. \quad (19)$$

Така умова означає, що всі три ПАЕ лежать на одній прямій. Зауважимо, що $c_{21} = 0$ і $c_{22} = 0$ виконується тоді, коли джерело рівновіддалене від усіх ПАЕ. Отже, така ситуація виникатиме за умови, коли два або всі три ПАЕ розташовані в одному місці.

Якщо $c_{21} = 0$ і $c_{22} \neq 0$ ($c_{21} \leq c_{22}$), то розв'язком є перетин кривої другого порядку і прямої. Система рівнянь набуде такого вигляду:

$$\begin{cases} x_1x + y_1y + c_{11} = 0; \\ (x_2x + y_2y + c_{12})/c_{22} = \sqrt{x^2 + y^2}. \end{cases} \quad (20)$$

Подамо рівняння прямої у параметричній формі:

$$\begin{cases} x = a_x t + x_0; \\ y = a_y t + y_0. \end{cases} \quad (21)$$

Якщо $x_1 \neq 0$, тоді $a_x = -y_1/x_1$; $x_0 = -c_{11}/x_1$; $a_y = 1$; $y_0 = 0$. Для $x_1 = 0$ приймемо $a_x = 1$; $x_0 = 0$; $a_y = -x_1/y_1$; $y_0 = -c_{11}/y_1$. Підставивши значення x і y в рівняння кривої, отримаємо:

$$[x_2(a_x t + x_0) + y_2(a_y t + y_0) + c_{12}]/c_{22} = \sqrt{(a_x t + x_0)^2 + (a_y t + y_0)^2}. \quad (22)$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} c_{41} &= (x_2 a_x + y_2 a_y)/c_{22}; & c_{42} &= (x_2 x_0 + y_2 y_0 + c_{12})/c_{22}; & c_{43} &= a_x^2 + a_y^2; \\ c_{44} &= 2(a_x x_0 + a_y y_0); & c_{45} &= x_0^2 + y_0^2; \\ c_{51} &= c_{41}^2 - c_{43}; & c_{52} &= 2c_{41}c_{42} - c_{44}; & c_{53} &= c_{42}^2 - c_{45}. \end{aligned} \quad (23)$$

Тоді рівняння спроститься до квадратного

$$c_{51}t^2 + c_{52}t + c_{53} = 0. \quad (24)$$

з додатковою умовою $c_{41}t + c_{42} \geq 0$. З отриманого значення t знайдемо координати x, y .

Якщо $c_{21} \neq 0$ і $c_{22} \neq 0$, то обидві криві не є виродженими. Розділимо перше рівняння на c_{21} , а друге на c_{22} і отримаємо:

$$\begin{cases} (x_1x + y_1y + c_{11})/c_{21} = \sqrt{x^2 + y^2}; \\ (x_2x + y_2y + c_{12})/c_{22} = \sqrt{x^2 + y^2}. \end{cases} \quad (25)$$

Віднімемо від першого рівняння друге та введемо позначення:

$$c_{13} = x_1/c_{21} - x_2/c_{22}; \quad c_{23} = y_1/c_{21} - y_2/c_{22}; \quad c_{33} = c_{11}/c_{21} - c_{12}/c_{22}. \quad (26)$$

Тоді систему рівнянь (25) можна подати так:

$$\begin{cases} c_{13}x + c_{23}y + c_{33} = 0; \\ (x_2x + y_2y + c_{12})/c_{22} = \sqrt{x^2 + y^2}. \end{cases} \quad (27)$$

Отримана система (27) аналогічна попередньому випадку, що характеризує перетин кривої другого порядку з прямою.

Після отримання розв'язків необхідно повернутись до початкової (ρ, φ, z) системи координат:

$$\varphi = x + \varphi_0; \quad h = y + h_0, \quad (28)$$

і промасштабувати:

$$z = Rh. \quad (29)$$

Комп'ютерне моделювання отриманих результатів. Після розв'язання системи рівнянь для кожного випадку ми отримали групу розв'язків, кожен з яких є коректним. Тому для усунення неоднозначності необхідний хоча б один додатковий ПАЕ. Маючи РЧП додаткових ПАЕ, можна відібрати коректний розв'язок з отриманих за допомогою наступного виразу, значення якого має бути мінімальним:

$$\sum_{i=3}^{N-1} [dist(\vec{r}, \vec{r}_i) / c - dist(\vec{r}, \vec{r}_0) / c - \Delta t_{0i}], \quad (30)$$

де N – кількість ПАЕ.

Для перевірки коректності отриманих розв'язків проведено віртуальний комп'ютерний експеримент, який підтвердив правильність виведених формул. Алгоритм тестування складався з таких кроків:

- введення координат трьох довільних ПАЕ на поверхні циліндра;
- вибір координат джерела АЕ;
- обчислення РЧП сигналу АЕ від джерела до всіх ПАЕ (пряма задача);
- знаходження координати джерела АЕ за координатами ПАЕ та РЧП (обернена задача);
- визначення похибки обчислень.

Розташування ПАЕ на поверхні циліндра здійснювали з кроком 5° за довготою та вздовж всієї висоти у рівновіддалених 100 точках. Координати джерел АЕ задавали з кроком 3° за довготою та вздовж всієї висоти у рівновіддалених 100 точках. Результати тестування показали максимальну похибку визначення координат джерел АЕ в 1 мкм за висоти зразка в 1 м і радіуса циліндра 0,5 м, яка фактично зумовлена обмеженою розрядністю представлення чисел у комп'ютері.

Проведення експериментальних вимірювань та їх результати. Для перевірки одержаних результатів використовували ненавантажений внутрішнім тиском об'єкт контролю циліндричної форми (рис. 3). Його параметри: радіус – 0,111 м, товщина стінки – 0,006 м, висота – 0,6 м, матеріал – ст. 20. Значення швидкості поширення хвилі було визначено експериментальним шляхом і порівняно з табличними даними. Вона становила 5200 м/с.

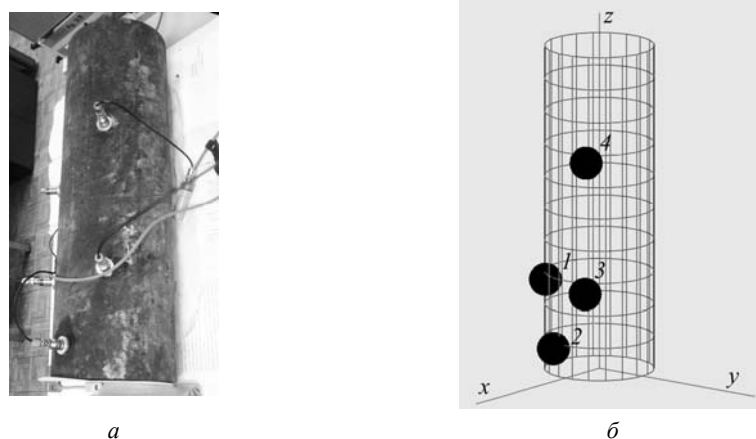


Рис. 3. Загальний вигляд досліджуваного об'єкта (а) і місця розташування ПАЕ (б).

Вимірювання здійснювали портативною восьмиканальною вимірювальною АЕ-системою SKOP-8M [4], вона забезпечує виявлення, виділення та реєстрацію

сигналів АЕ по восьми вимірювальних каналах з подальшим збереженням їх у пам'яті 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 дБ.

Перед початком робіт здійснювали відповідні налаштування АЕ-системи SKOP-8М: кількість вимірювальних каналів – 4 (підсилення кожного 40 дБ); тривалість виборки – 2 мс; період дискретизації аналогового сигналу – 0,5 мкс; частота зрізу фільтра низьких частот – 600 кГц; фільтра високих частот – 200 кГц; поріг дискримінації – 23 %; рівень власних шумів, приведений до входу попереднього підсилювача – 7 мкВ. Розташування ПАЕ на об'єкті показано на рис. 3, а координати – в табл. 1.

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

№ місць встановлення ПАЕ	R, м	φ, рад	h	x	y	z
			м			
1	0,111	5,200	0,178	0,052	-0,097	0,178
2	0,111	5,970	0,055	0,106	-0,034	0,055
3	0,111	0,407	0,177	0,102	0,044	0,177
4	0,111	0,427	0,450	0,101	0,046	0,450

Пружну хвилю АЕ збуджували за допомогою джерела Гсу [12] (злам графітового стрижня діаметром 0,5 мм, твердістю 2Н).

У табл. 2 наведено результати обчислення координат джерел АЕ за отриманими нами розв'язками. Абсолютну похибку знаходили за формулою

$$\Delta = \text{dist}(\vec{r}, \vec{r}_e), \quad (31)$$

де \vec{r} – радіус-вектор заданого джерела АЕ; \vec{r}_e – радіус-вектор джерела АЕ, отриманого за допомогою системи SKOP-8М. Відносну похибку шукали за виразом [2]:

$$\delta = \Delta / r_b \cdot 100\%, \quad (32)$$

де $r_b = 0,15$ м – мінімальна відстань між ПАЕ (база вимірювань).

Таблиця 2. Результати випробувань

№	Реальні координати (R, φ, h)	Отримані координати (R, φ, h)	Δ, мм	δ, %
1	(0,111; 0,000; 0,300)	(0,111; 0,004; 0,298)	4	3,0
2	(0,111; 0,450; 0,100)	(0,111; 0,452; 0,102)	3	1,9
3	(0,111; 0,450; 0,500)	(0,111; 0,452; 0,503)	4	2,4
4	(0,111; 5,100; 0,250)	(0,111; 5,105; 0,256)	8	5,2

ВИСНОВКИ

Запропонований підхід до розв'язання задачі визначення координат джерел сигналів АЕ на поверхні тонкостінного циліндричного об'єкта контролю, за даними трьох, довільно розташованих, включаючи виродженні випадки, ПАЕ, дав змогу отримати її однозначні розв'язки.

Запропонована методика скорочення кількості обчислень і спрощення алгоритму зменшила число розгалужень з дев'яти до чотирьох, які можуть бути легко розпаралелені.

За аналізом отриманих розв'язків задачі визначено мінімальну кількість ПАЕ, необхідних для однозначного знаходження джерела АЕ, що дорівнює чотирьом.

Комп'ютерне моделювання з урахуванням всіх можливих варіантів розміщення ПАЕ та джерел АЕ виявило, що максимальна похибка не перебільшує 1 мкм і зумовлена обмеженою розрядністю персонального комп'ютера.

За результатами фізичного експерименту на реальному циліндричному об'єкті в лабораторних умовах випробувань доведено, що похибка визначення координат не перевищує 5,3%, що цілком задовольняє вимоги нормативних документів до методик АЕ-контролю промислових об'єктів.

1. *Андрейків О. Є., Скальський В. Р., Сулим Г. Т.* Теоретичні основи методу акустичної емісії в механіці руйнування. Монографія. – Львів: Сполом, 2007. – 480 с.
2. *Державний стандарт України. ДСТУ 4227-2003.* Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 26 с.
3. *Назарчук З. Т., Скальський В. Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: наук.-техн. посіб. у 3 т. – К.: Наук. думка, 2009. – Т. 2. – 263 с.
4. *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.
5. *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.
6. *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. – **28**. – P. 85–98.
7. *Asty M.* Acoustic emission source location on a spherical or plane surface // NDT Intern. – 1978. – **II**, № 5. – P. 223–226.
8. *Barat P., Kalyanasundaram P., Raj Baldev.* Acoustic emission source location on a spherical or plane surface // NDT Intern. – 1993. – **26**, № 6. – P. 295–297.
9. *Ambiguity of source location in acoustic emission technique / P. Barat, P. Mukherjee, P. Kalyanasundaram, Baldev Raj // World Conf. on Non-Destructive Testing.* – New Delhi, 1996. – **4**. – P. 2569–2574.
10. *Dong-Jin Yoon, Young H. Kim, Oh-Yang Kwon.* New algorithm for acoustic emission source location in cylindrical structure // J. Acoust. Emiss. – 1992. – **9**, № 4. – P. 237–242.
11. *Detecting the point of impact on a cylindrical plate by the acoustic emission technique / T. Hajzargarbashi, H. Nakatani, T. Kundu, N. Takeda // Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems.* – 2011. – Vol. 7981.
12. *Hsu N.* Acoustic emission simulator, USA Patent 4018084 assigned to Lockheed Aircraft Corporation, 13 May. – 1976.
13. *Lympertos E., Dermatas E.* Best sensors position for accurate location of acoustic emission sources on cylindrical surfaces // Int. Conf. on Computational & Experimental Eng. and Sci. – 2003.
14. *Stepanova L. N., Tenitilov E. S.* Localization of Acoustic-Emission Sources in Objects with Small Geometric Dimensions // Russian J. Nondestructive Testing. – 2012. – **48**, № 11. – P. 662–671.