

УДК 621.129.32

**І.З. Лютак**, к.т.н.  
**І.С. Кісіль**, д.т.н.

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЯВЛЕННЯ ДОННИХ ДЕФЕКТІВ УЛЬТРАЗВУКОВИМИ СПРЯМОВАНИМИ КІЛЬЦЕВИМИ ХВИЛЯМИ**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, [zarichna@nung.edu.ua](mailto:zarichna@nung.edu.ua)

*Представлено метод контролю дефектів за допомогою ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль (УСКХ) в стінках трубопроводів. Розроблена модель поширення УСКХ засобами скінченних елементів та представлено результати розрахунку. Представлено результати лабораторних досліджень виявлення дефектів за допомогою УСКХ.*

**Ключові слова:** *ультразвук, дефект, трубопровід, метод скінченних елементів, ультразвукова спрямована кільцева хвиля.*

### **Вступ**

Контроль донних дефектів в стінках магістральних трубопроводів є однієї із найбільш складних задач, оскільки такі протяжні об'єкти мають по своїй довжині значну кількість перешкод, що ускладнюють доступ засобами традиційних методів (ручний контроль з допомогою дефектоскопів та автоматичний за допомогою інспекційних снарядів та роботів). До таких перешкод належать як різного роду опори, так і наявність технологічних колін, повітряних переходів, підземні ділянки тощо. Забезпечити контроль стінок магістральних трубопроводів в труднодоступних місцях, підвищити достовірність можна за допомогою застосування ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль (УСКХ). Їх особливістю є те, що вони поширюються по околу стінки труби та займають всю її товщину.

Метод обчислення дисперсних параметрів УСКХ засобами скінченних елементів було запропоновано групою науковців на чолі із Дж. Фонгом [1]. В своїй праці вони запропонували застосувати модальний аналіз структури із циклічною симетрією для визначення високочастотних значень власних чисел та векторів трубопроводу. Для порівняння ними було запропоновано метод асимптотичного обчислення дисперсних параметрів УСКХ. Недоліком їх підходу є складність визначення дійсного набору мод, що генеруються ультразвуковим первинним перетворювачем експериментально, згідно представлених цими науковцями теоретичних методів. Науковці Х. Нішіто та К. Йошіда запропонували метод генерування горизонтально-поляризованих мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль первинним перетворювачем вузької частотної смуги із сухим акустичним контактом [2]. Запропонований підхід є недостатньо гнучким у виборі величини фазової швидкості УСКХ, що не дозволяє ефективно застосовувати його для трубопроводів широкого спектру діаметрів та товщин стінок. Визначення параметрів акустичного поля при взаємодії із дефектом прямокутної форми в трубі діаметром 169 мм було здійснено науковцями на чолі із Л. Сатярнараяном з Індії [3]. Моді УСКХ науковці збуджували первинними перетворювачами на базі антенних ґраток при використанні програмного забезпечення, що не може бути застосоване для трубопроводів великих діаметрів. Взаємодію УСКХ із дефектами досліджували науковці на чолі із Ю. Джіангонгом з КНР на базі трубопроводу діаметром 19 мм [4]. В результаті досліджень було встановлено явище трансформації мод при взаємодії із дефектом. Недоліком цієї роботи є те, що параметри луно-імпульсу визначаються на основі ортогонального розкладу в ряд поліному, що описує УСКХ. Дефект в роботі було змодельовано із розмірами, що дорівнюють товщині стінки труби. Такий підхід не може бути використаний для визначення луно-імпульсу УСКХ від дефекту в стінці труби із розмірами меншими ніж товщина стінки. Для неруйнівного контролю труб великого діаметру необхідно подальше дослідження властивостей ультразвукового поля УСКХ. Особливо важливо є виявлення донних дефектів в стінках труб великої товщини, оскільки є невизначеність щодо взаємодії поля УСКХ та берегів дефектів при утворенні луно-імпульсу. Найбільш повною є математична модель, що описує параметри поширення УСКХ в стінці труби представлена в праці [5]. В цій праці визначено як властивості УСКХ так і пояснено принцип їх формування та основні відмінності від спрямованих хвиль.

Завдання даної роботи є провести експериментальні дослідження виявлення донних дефектів в стінках магістрального трубопроводу великого діаметру та товщини стінки

ультразвуковими спрямованими кільцевими хвилями. В результаті роботи необхідно визначити придатність УСКХ для розроблення методу неруйнівного контролю.

### Моделювання поширення УСКХ в стінці труби

Для визначення можливості взаємодії УСКХ із донним дефектом в товстостінному трубопроводі побудуємо модель на базі скінченних елементів реалізованих в пакеті програм Abaqus [6]. Даний пакет програм реалізує рішення диференціальних рівнянь поширення пружних коливань в загальному вигляді:

$$\mathbf{M} \times \mathbf{u}'' + \mathbf{C} \times \mathbf{u}' + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = \mathbf{F}(t), \quad (1)$$

де  $\mathbf{u}''$ ,  $\mathbf{u}'$ ,  $\mathbf{u}$  – відповідно вектори прискорення, швидкості та переміщення вузлів скінченних елементів пластини;  $\mathbf{M}$  – матриця маси;  $\mathbf{C}$  – матриця демпфування;  $\mathbf{K}$  – матриця жорсткості;  $\mathbf{F}(t)$  – вектор навантаження.

Рівняння (1) стосується будь-якої форми досліджуваного об'єкту в якому поширюється пружне коливання. Для обчислення поширення УСКХ розробимо таку модель у двовимірному просторі:

- сегмент труби діаметром 1020 мм та товщиною стінки 16 мм;
- розміри дефекта є такими ширина 2 мм, глибина 7.2 мм;
- форма дефекту виберемо прямокутною на основі підходу Ч. Жанга для забезпечення відносної простоти моделювання та твердження, що взаємодія такого типу дефекту із ультразвуковою хвилею дає достатню інформацію про луно-сигнал, яку можна використати для реальних дефектів [7];

- граничні умови задаються вільними, напруження на поверхні стінок дорівнює нулю.

Для збудження пружних коливань широкосмуговим первинним перетворювачем із центральною частотою 2.5 МГц із врахуванням, що амплітуда  $A$  в збуджуючого сигналу наростає до максимального значення та загасає до нуля за час, що дорівнює 5-ти коливанням гармонійної складової. Побудова форми збуджуючого сигналу із 5-ти періодів з максимальною амплітудою в третьому періоді, властиво для типового збудження пружних коливань первинним перетворювачем представлених, наприклад, в праці [4].

Результати обчислення поширення УСКХ в стінці труби представимо у частотній області із розподілом поля прискорень по товщині стінки, (рис. 1).

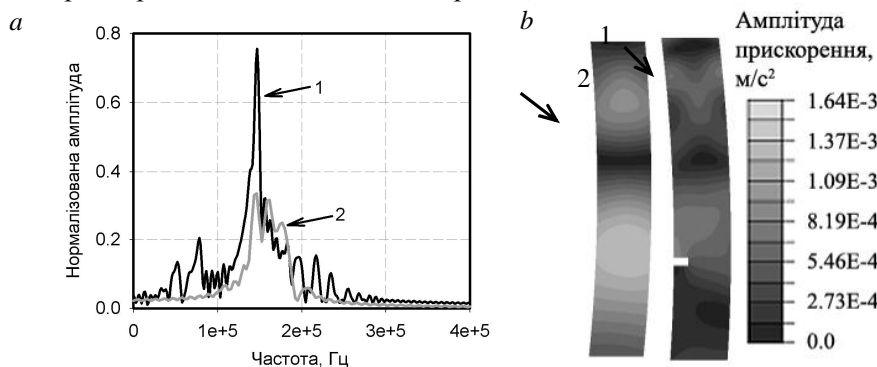


Рис. 1. Порівняльний аналіз поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в стінці труби з дефектом (1) та без нього (2): а – спектр сигналу, б – розподіл амплітуд прискорень хвилі.

Амплітуди приведених спектрів, (рис. 1), нормалізувались по відношенню до максимального значення спектру частини сигналу кільцевої хвилі, що поширювалась в зразку до взаємодії з дефектом, оскільки цей спектр має найбільший максимум амплітуди. Із рис. 1а можна побачити, що луно-сигнал УСКХ має значно більшу амплітуду ніж у хвилі, що поширюється без дефекту в стінці труби. Ще однією відмінністю цих двох спектрів є те, що та частина спектру, що є більшою за другий має вузьку пікову форму. Це дає підставу зробити припущення про те, що із донним дефектом взаємодіє лише частина УСКХ із певними амплітудно-частотними параметрами.

Для наочної ілюстрації зроблених припущень приведемо розподіл амплітуд прискорень ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль по товщині стінки труби у досліджуваному сегменті (рис. 1б). На цьому рисунку спостерігається нерівномірність розподілу амплітуд прискорень двох ультразвукових хвиль по товщині стінки. У взаємодії з дефектом бере участь лише частина хвилі

фронт якої падає на його береги. При достатній амплітуді падаючої на береги дефекту ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі утворюється відбита хвиля внаслідок відбиття.

При детальнішому аналізі розподілу амплітуди по товщині стінки труби можна простежити, що частина хвиль має більшу концентрацію енергії по середині стінки, інша – по краях. Тому на дефекти, розташовані в різних місцях товщини стінки труби будуть реагувати різні частини пружних хвиль. Оскільки моди ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль розподілені по всій товщині стінки труби, то вони будуть взаємодіяти із дефектами розташованими в довільному місці по товщині стінки труби при відповідному співвідношенні довжини хвилі та розміру дефекту.

### Проведення експерименту контролю донних дефектів в стінці труби за допомогою УСКХ

Параметри дефекту є такими: діаметр 6 мм, висота від внутрішньої сторони труби 6 мм. Товщина стінки труби 16 мм. Ультразвукова хвиля генерувалась на частоті 2.5 МГц прямим УПП із кутом нахилу 14°, рис. 2.

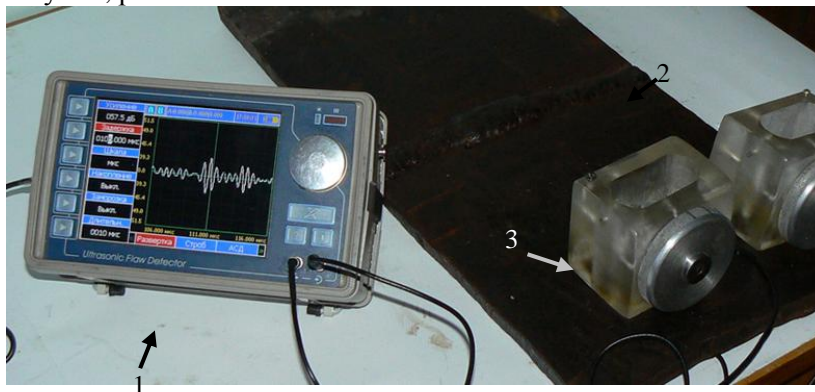


Рис. 2. Система неруйнівного контролю труб КТУ-1 на основі ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль: 1 – вторинний пристрій, 2 – сегмент труби, 3 – система давачів генерування та реєстрації ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль

Експеримент проводився для двох випадків. У першому випадку по шляху проходження УСКХ дефектів в стінці труби не було. При цьому було зареєстровано сигнал та виділено окремі пакети хвиль, що репрезентують окремі моди УСКХ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри поширення мод ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль				
Номер моди УСКХ	1	2	3	4
Швидкість, м/с	3733	2995	2477	2349

У другому випадку УСКХ поширювалась в напрямку дефекту. Для цього було визначено відстані до дефектів і розраховано час приходження луно-імпульсів від дефекту до приймального УПП. Перший розрахований луно-імпульс із швидкістю 3733 м/с гарно видно у порівнянні із амплітудою коливань хвиль, що поширюються від генеруючого УПП до приймального.

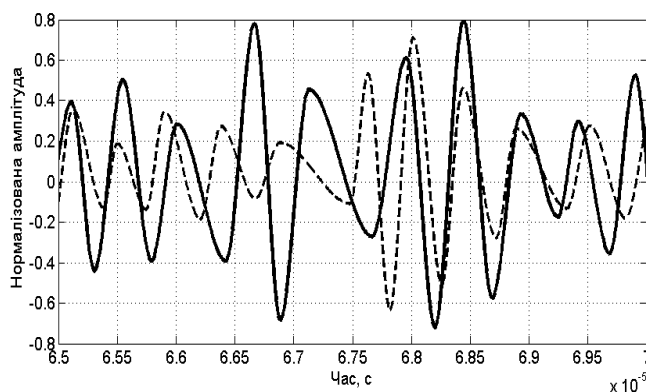


Рис. 3. Друга мода сигналу ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль: суцільна лінія – сигнал в зразку з дефектом, штрихова – без дефекту.

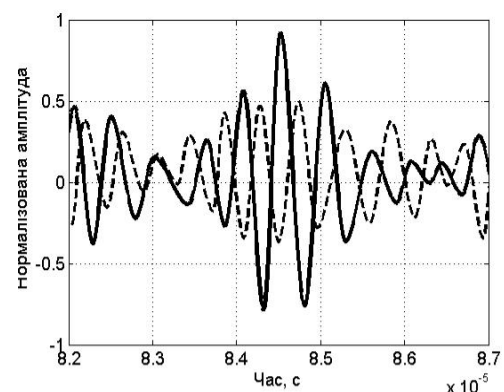


Рис. 4. Четверта мода сигналу ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль: суцільна лінія – сигнал в зразку з дефектом, штрихова – без дефекту.

Швидкість другого луно-імпульсу від дефекту складає 2995 м/с і повністю співпадає із розрахованим значенням швидкості поширення для пакету імпульсів, що поширюється від генеруючого до приймального УПП (рис. 3). Імпульс зареєстрований на 66 мкс. Наступний розрахований луно-імпульс від дефекту із швидкістю 2477 м/с за амплітудою дорівнював сигналам, що поширювались від генеруючого УПП, тому на практиці їх детектувати є складно. Четвертий луно-імпульс УСКХ із швидкістю поширення 2349 м/с (рис. 4) співпав із приходженням на приймальний УПП прямого сигналу. Незважаючи на це, його можна легко виокремити за величиною амплітуди та фазою коливаний.

Набір мод уворених нахиленим ультразвуковим первинним перетворювачем залежить як від кута нахилу так і ширини частотної смуги. Тому для кожного нового перетворювача необхідно проводити визначення амплітудно – частотних параметрів мод УСКХ в стінці труби без дефектів. Такі набори тестових значень мод УСКХ можна отримати на аварійному запасі труби.

Важливим етапом ефективного застосування методу контролю наявності дефектів є обробка сигналу УСКХ. Перед методом обробки сигналу ставляться такі завдання: а) оцифрувати сигнал, б) очистити від завад без зменшення точності, в) виокремити інформативну складову. Проведені дослідження встановили ефективність вейвлет – перетворення для виконання поставлених завдань. Як результат, сигнал УСКХ зберігається на цифровому носії інформації як набір масивів окремих рівнів вейвлет – перетворення, подальший аналіз яких визначає найбільш інформативні з них.

Мінімальні розміри дефекту, які можна виявити за допомогою УСКХ повністю визначаються існуючою теорією ультразвукового контролю, оскільки залежать від довжини хвилі.

### Висновки

Виявлені закономірності поширення мод УСКХ дозволяють стверджувати, що вони є ефективним інструментом для розроблення методу ультразвукового контролю дефектів незалежно від місця їх розташування по товщині стінки труби. Зважаючи на особливості їх поширення на значно більші відстані у порівнянні із об'ємними хвилями, ними можна контролювати труднодоступні місця магістральних трубопроводів (під опорами, частково засипаних ґрунтом тощо).

### Список літературних джерел

1. J. Fong. Fast techniques for calculating dispersion relations of circumferential waves in annular structures / J. Fong, M.J.S. Lowe, D. Gridin, R.V. Craster // Review of Progress in Quantitative NDE (American Institute of Physics).- 2003.- № 22.- P. 213-220.
2. H. Nishino. Simple method of generating for circumferential shear horizontal waves in a pipe and their mode identifications / H. Nishino and K. Yoshida. // Acoustical Science and Technology.- 2006.- Vol. 27.- № 6.- P.389-392.
3. L. Satyarnarayana. Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions / L. Satyarnarayana, J. Chandrasekaran, Bruce Maxfield, Krishnan Balasubramaniam // NDT & E International.- 2008.- Volume 41.- Issue 1.- p. 32-43.
4. Yu Jiangong. Guided circumferential waves in orthotropic cylindrical curved plate and the mode conversion by the end-reflection / Yu Jiangong, Wu Bina, He Cunfua // Applied Acoustics.- 2007.- Volume 68.- Issue 5.- p. 594-602.
5. Лютак І. З. Побудова та обчислення математичної моделі поширення кільцевих мод в трубопроводі спрямованими хвилями в ультразвуковому діапазоні частот [Текст] / Ігор Лютак // Технічна діагностика і неруйнівний контроль. - 2009.- № 2.- С. 30-35.
6. Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Abaqus [електронний ресурс]: версія 6.9.1 / Компанія Simulia.- 2009.- 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM).- Системні вимоги: Windows XP.- Назва з титул. екрану.
7. Ch Zhang. On Wave Propagation in Elastic Solids with Cracks (Advances in Fracture Mechanics) / Ch. Zhang, D. Gross.- Southampton: Computational Mechanics, 1997.- 272 p. - ISBN: 978-1853125355.