Дослідження та методи аналізу

УДК 622.24.05-004.4
DOI: 10.31471/1993-9973-2018-2(67)-21-26

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ НА ПРИКЛАДІ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ

І.З. Лютак, З.П. Лютак

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +38 068 5412069, e-mail: igor@lyutak.com

Здійснено аналіз методів акустичного контролю наявності неоднорідностей в стінці металевого трубопроводу. Дано основні математичні рівняння, що описують поширення та взаємодію акустичної хвилі із неоднорідністю в пружному середовищі. Представлено метод розрахунку та наведено результати для взаємодії акустичної хвилі із неоднорідністю у вигляді еліпсоїда.
Ключові слова: акустична хвиля, контроль, неоднорідність, дефект, технічний стан.

Осуществлен анализ методов акустического контроля наличия неоднородностей в стенке металлического трубопровода. Даны основные математические уравнения, описывающие распространение и взаимодействие акустической волны с неоднородностью в упругой среде. Представлен метод расчета и приведены результаты для взаимодействия акустической волны с неоднородностью в виде эллипсоида.
Ключевые слова: акустическая волна, контроль, неоднородность, дефект, техническое состояние.

The analysis of the methods of acoustic control of the availability of nonuniformities in the wall of the metal pipeline is carried out. The basic mathematical equations describing the propagation and interaction of an acoustic wave with nonuniformity in an elastic medium are given. The method of calculation is presented and the results for the interaction of an acoustic wave with nonuniformity in the form of an ellipsoid are presented.
Keywords: acoustic wave, control, nonuniformity, defect, technical condition.

Постановка проблеми. Металеві технологічні об'єкти, зокрема магістральні трубопроводи становлять значну частку в економічному, соціальному, політичному вимірах життя України. Забезпечення високої надійності їх експлуатації є однією з важливих науково-практичних проблем. В Україні та світі немає чітко визначених правил, нормативних документів, що можуть однозначно дати відповідь про безпечне подовження терміну експлуатації технологічних об'єктів без попереднього контролю технічного стану металу.

Аналіз досліджень і публікацій. Ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі (УСКХ) в неруйнівному контролі застосовують для труб малого діаметру та товщини стінки [1, 2]. Група науковців на чолі із Л. Сатярнараяном з Індії досліджували хвильові властивості взаємодії УСКХ із дефектом прямокутної форми в стінці труби діаметром 169 мм [3]. Недоліком цієї роботи поряд із тим, що досліджується трубопровід із малим діаметром є те, що моди УСКХ збуджуються спеціальним ультразвуковим первинним перетворювачем (УПП) побудованим на основі фазованих антенних ґраток, що не дозволяє широко застосовувати запропонований вказаними науковцями підхід в Україні для контролю магістральних нафтогазопроводів. Дисперсні параметри розраховуються спеціальним програмним забезпеченням, що не розраховане для геометричних розмірів магістральних трубопроводів. Науковці на чолі із Ю. Джіангонгом з КНР досліджували луно-

імпульси УСКХ в трубопроводі 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.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для неруйнівного контролю труб великого діаметру необхідно подальше дослідження властивостей ультразвукового поля УСКХ. Особливо важливим є виявлення донних дефектів в стінках труб із товщинами, які дорівнюють кільком довжинам хвилі, оскільки є невизначеність щодо взаємодії поля УСКХ та берегів дефектів при утворенні луноімпульсу.

Постановка завдання. Дослідження спрямоване на розроблення підходу для оцінки поля луно-імпульсу від неоднорідності (дефекту) УСКХ в стінках труб великого діаметру, з яких складаються магістральні трубопроводи, для побудови ефективного методу контролю наявності неоднорідностей в металевих технологічних об'єктах.

Виклад основного матеріалу. Для математичного опису генерування УСКХ застосуємо підхід, представлений І. Вікторовим, у якому описується співвідношення між довжиною об'ємної ультразвукової хвилі та товщиною середовища поширення. Хоча І. Вікторовим описано утворення хвиль Лемба в пластині, базове визначення моди ультразвукової хвилі стосується також і всіх ультразвукових спрямованих хвиль, в тому числі і кільцевих спрямованих хвиль. Застосування підходу І. Вікторова будемо здійснювати для мод УСКХ. Умова утворення моди УСКХ визначається із хвильових параметрів моди обчислюються в залежності від кількості збуджених мод та геометричних розмірів досліджуваного трубопроводу.

Аналіз поширення УСКХ будемо здійснювати в моделі, (рис. 1).

Для математичного опису поширення УСКХ в стінці труби скористаємось методом скінченних елементів, реалізованих в пакеті програм Comsol [8]. Даний пакет програм реалізує рішення таких диференційних рівнянь поширення пружних коливань:

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

де $\{u''\}, \{u'\}, \{u\}$ – відповідно вектори прискорення, швидкості та переміщення вузлів скінченних елементів пластини;

$[M]$ – матриця маси;

$[C]$ – матриця демпфування;

$[K]$ – матриця жорсткості;

$F(t)$ – вектор навантаження.

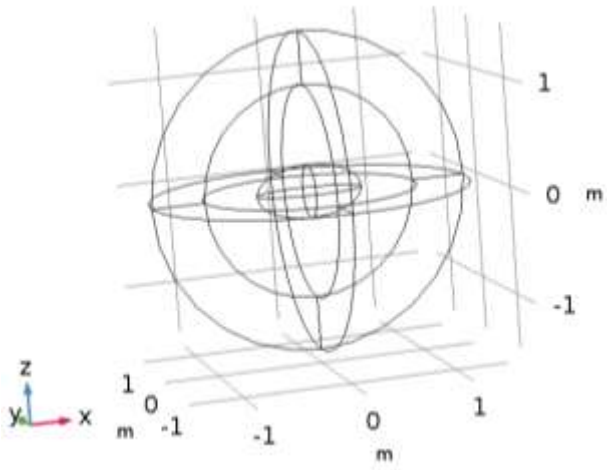


Рисунок 1 – Модель металевого середовища із неоднорідністю в центрі для проведення моделювання поширення ультразвукової хвилі

Рівняння (1) описує поширення будь-якого пружного коливання, в тому числі і УСКХ при відповідних умовах. Першою умовою для опису УСКХ є побудова форми середовища поширення, що на площині має форму перерізу стінки труби січною площиною, перпендикулярною до осі трубопроводу. Граничні умови задаються вільними, компонент напруження нормальний до границі розділу середовищ дорівнює нулю.

У рівнянні (1) матриця маси фактично описує розподіл матеріалу у відповідності до заданої форми досліджуваного об'єкту і додатково залежить від його густини. Матриці демпфування та жорсткості описують фізико-механічні властивості матеріалу. Розв'язок (1) отримуємо з розділенням окремих компонент векторів прискорення, переміщення та напруження, що дозволяє уникнути додаткових математичних перетворень для розділення полів поздовжньої та поперечної хвиль. Це робить можливим дослідження параметрів УСКХ як суперпозиції об'ємних хвиль [7, 6].

Для застосування (1) до опису поширення УСКХ необхідно побудувати відповідний до профілю труби об'єкт і задати необхідні параметри матеріалу. Обчислення проведемо на сегменті труби діаметром 1020 мм та товщиною стінки 16 мм. Для зменшення обчислювальних ресурсів, масштабуємо довжину акустичної хвилі та величину неоднорідності, (рис. 1). Форма дефекту вибрана еліпсоїдною 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.

Збуджуючий сигнал $F(t)$ змоделюємо як коливання чутливого елементу п'єзоперетворювача за гармонійним законом так:

$$F(t)=A\sin(\omega_0 t)\,, \quad (2)$$

де A – амплітуда сигналу,

ω_0 – кутова частота сигналу.

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

В силу інерційних процесів ультразвуковий первинний перетворювач максимальну амплітуду коливань дає через певний час, який відповідає кільком періодам. Для врахування інерційних процесів в рівнянні (2) амплітуду сигналу A визначимо як функцію $A = A(t)$, при цьому гармонійна складова коливання $\sin(\omega_0 t)$ змінюватись не буде. Збуджуючий сигнал складається із 5-ти періодів з максимальною амплітудою в третьому періоді, що властиво для типового збудження УСКХ представленого, наприклад, в праці [4].

Для збудження УСКХ широкосмуговим первинним перетворювачем із центральною частотою 2 КГц із врахуванням, що амплітуда A в (2) збуджуючого сигналу плавно наростає до максимального значення та плавно загасає до нуля, запишемо таке рівняння:

$$F(t)=\begin{cases} A_0 \sin(\omega_0 t/10)\sin(\omega_0 t), & 0 < t \le 1.8E-6 , \\ 0 , & 1.8E-6 < t \le 2.0E-6 , \end{cases} \quad (3)$$

де A_0 – максимальна амплітуда.

Частота дискретизації $F(t)$ залежить від результатів сходження алгоритму обчислення поширення ультразвукових коливань. Тривалість кроку обчислення була вибрана змінною для зменшення часу розрахунків. З метою забезпечення рівномірної дискретизації результатів на виході алгоритму було застосовано згладжуючий фільтр.

Амплітуда сигналу на відрізку між заданими точками дискретизованого збуджуючого сигналу розраховувалась так:

$$a = A_i + (A_{i+1} - A_i)\xi^3\left(10 - 15\xi + 6\xi^2\right),$$

$$\xi = (t - t_i)/(t_{i+1} - t_i) , \quad (4)$$

де t_i , t_{i+1} – відповідно час точок дискретизації;

t – час у проміжку $[t_i , t_{i+1}]$;

A_i , A_{i+1} , a – відповідно амплітуди збуджуючого сигналу у точках часу t_i, t_{i+1} , t.

Рівняння (4) апроксимує результати тільки між двома точками в часі. Тому для точного представлення збуджуючого сигналу необхідно забезпечити більш щільну дискретизацію сигналу, ніж визначено з теорії обробки сингалів. Час t вибирається на апроксимованому інтервалі часу виходячи із умови сходження результатів розрахунку. При збільшенні похибки розрахунку за задану величину час t зменшується. Для врахування демпфувальних характеристик ультразвукової хвилі, що поширюється в сталі, вибрано модель Релея із коефіцієнтом демпфування за масою $\alpha_R = 0.001$ с$^{-1}$ та демпфуванням за жорсткістю $\beta_R = 1\cdot10^{-9}$ с [0]. Коефіцієнт демпфування за масою впливає на значення абсолютних швидкостей і пропорційний масі елемента. Коефіцієнт β_R впливає на швидкість зміни деформації в системі і характеризує тип матеріалу. Фактично демпфування за жорсткістю обчислюється шляхом додавання додаткових напружень [8]:

$$\sigma_\partial = \beta_R [K] \varepsilon , \quad (5)$$

де σ_∂ – додаткове напруження від демпфування;

ε – деформації.

Напруження σ_∂ враховуються тільки на етапі обчислення пружного відгуку системи в точках інтегрування при формуванні рівнянь динамічного балансу і не вносяться до результатів обчислення сумарного напруження в скінченних елементах.

Проведення розрахунку поширення УСКХ в стінці труби. Параметри сталі сегменту труби є такими: густина 7850 кг/м^3, модуль Юнга $2.1\cdot10^{11}$ Па, коефіцієнт Пуассона 0.3. На верхніх гранях досліджуваного сегменту записувались зміни компонентів прискорень при проходженні УСКХ. Експеримент проводився для двох випадків. У першому випадку моделювалось поширення ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі в досліджуваному сегменті без дефекту.

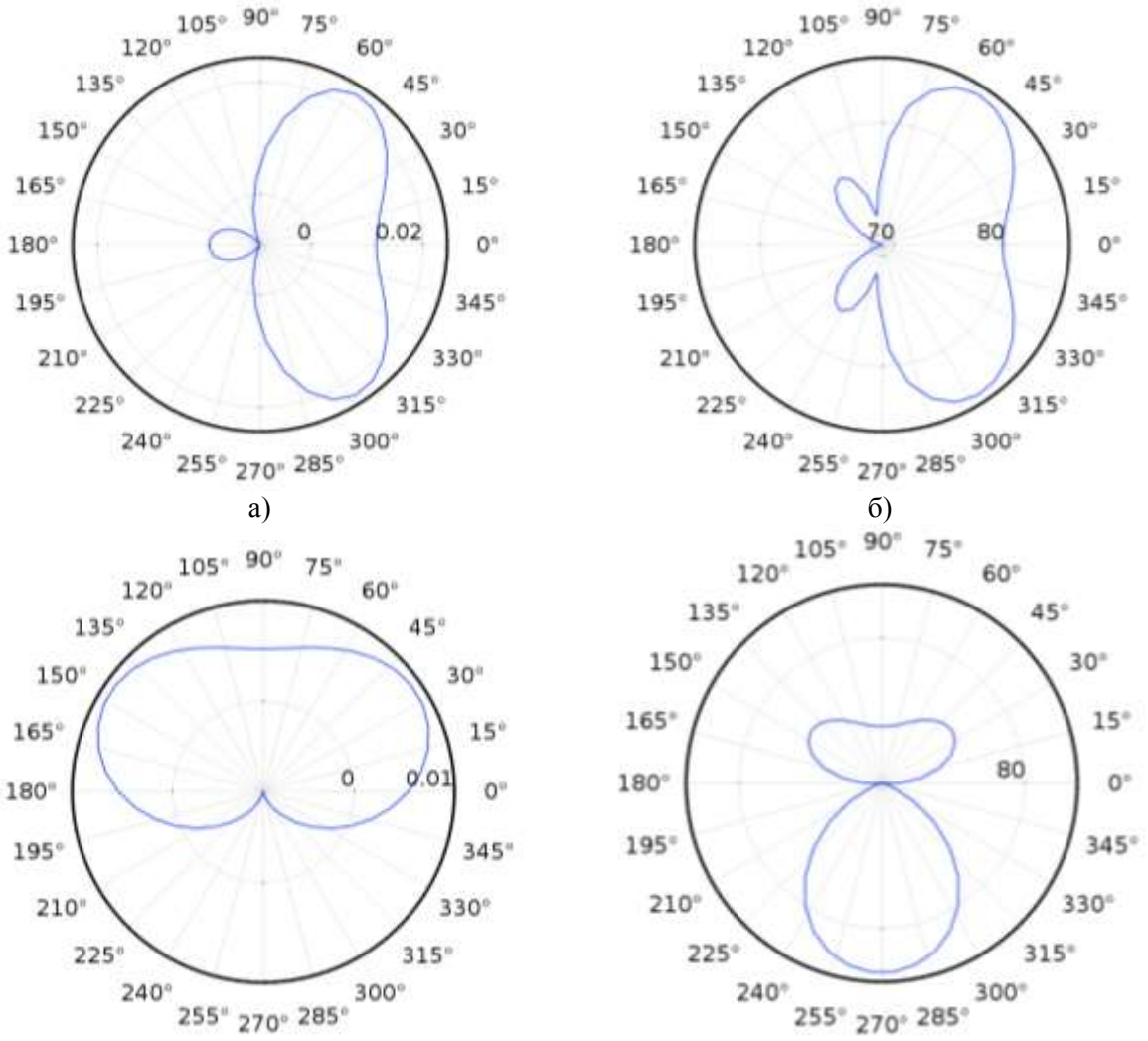
Результати обчислення поширення нульової моди в стінці труби з дефектом (рис. 2) показують, що після закінчення зондуючого імпульсу поверхня контакту п'єзоперетворювач – метал в силу інерційних процесів може відтворювати загасаючі коливання.

Амплітуда сигналу нормалізувалась шляхом ділення сигналу на своє максимальне значення. Місце реєстрації коливань розташоване на куті 45º по околу труби на її поверхні. В цьому випадку відстань від місця генерування УСКХ та від дефекту є однаковою.

З рис. 2 видно, що найбільше енергії коливань зосереджено у тій частині хвилі, що йде за фронтом. Після максимуму коливань енергія хвилі поступово зменшується з часом. Проте, в кінці генеруючого імпульсу спостерігається збільшення амплітуди, що може відповідати додатковому джерелу коливань. В кінці розглянутого часового проміжку спостерігається збільшення амплітуди, що утворюється відбитою УСКХ.

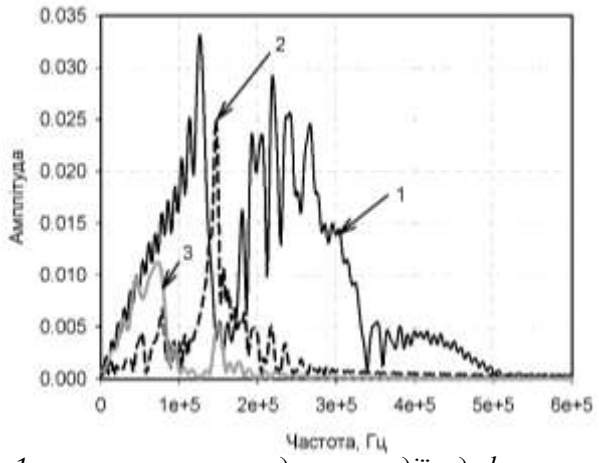
При порівнянні розрахованих форм хвиль, що поширюються в досліджуваному зразку з дефектом та без нього у діапазоні часу, спостерігається значна різниця в амплітудах. Деякі частини сигналу є в протифазі, що може бути пояснено генерування таких хвиль коливаннями берегами дефекту.

Для подальшого аналізу сигналу УСКХ, що поширюється в зразку з дефектом, його було розділено на три частини. Перша частина розділеного сигналу формувалась із тієї частини загального, що відповідає часу поширення УСКХ від місця генерування до дефекту та зворотного шляху до місця реєстрації. Решта розділеного сигналу заповнювалась нулями таким чином, щоб довжина розділеного сигналу містила таку ж кількість точок вибірки, що і загальний сигнал. Другий розділений сигнал формувався із загального на час проходження луно-імпульсу від дефекту через місце запису до початку відбитого сигналу від кінця зразка. Початок та кінець другого розділеного сигналу заповнювався нулями. Третій розділений сигнал містить частину УСКХ, що відбита від другого кінця зразка. Початок цього сигналу заповнений нулями. Це дозволяє порівнювати результати аналізу в частотній області трьох розділених сигналів (рис. 3).



а – акустичний тиск хвилі в площині xy(Па), б – акустичний тиск хвилі в площині xy(Дб), в – акустичний тиск хвилі в площині yz(Па), г – акустичний тиск хвилі в площині yz(Дб)

Рисунок 2 – Розподіл тиску акустичного поля від взаємодії падаючої хвилі із неоднорідністю



1 – частина сигналу до взаємодії з дефектом, 2 – частина сигналу від взаємодії з дефектом, 3 – частина сигналу відбитого від другого кінця зразка

Рисунок 3 – Спектр ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі у зразку з дефектом

У результаті порівняння величин спектрів трьох частин сигналу УСКХ можна зробити висновок про значну амплітуду тієї частини сигналу, яка формувалась хвилею, що утворена дефектом. Це вказує на перспективність застосування цих хвиль для контролю дефектів в стінках магістральних трубопроводів.

Із частотного аналізу (рис. 3) можна побачити, що луно-імпульс від дефекту відрізняється від іншої частини сигналу УСКХ своїм частотним діапазоном, він має пікову форму. Це дозволяє стверджувати, УСКХ розподілена по товщині стінки неоднорідно в частотному діапазоні, а тому донний дефект впливає не однаково на всі частини сигналу УСКХ. Для підтвердження припущення порівняємо спектральні параметри такої ж частини сигналу УСКХ, що поширюється без дефекту. Амплітуди приведених спектрів нормалізувались по відношенню до максимального значення спектру частини сигналу УСКХ, що поширювалась в зразку до взаємодії з дефектом, оскільки цей спектр має

ISSN 1993–9973 print
ISSN 2415–332X online

найбільший максимум амплітуди. Із рис. 4 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, має вузьку пікову форму. Це підтверджує припущення, зроблені раніше, про те, що із донним дефектом взаємодіє лише частина сигналу УСКХ.

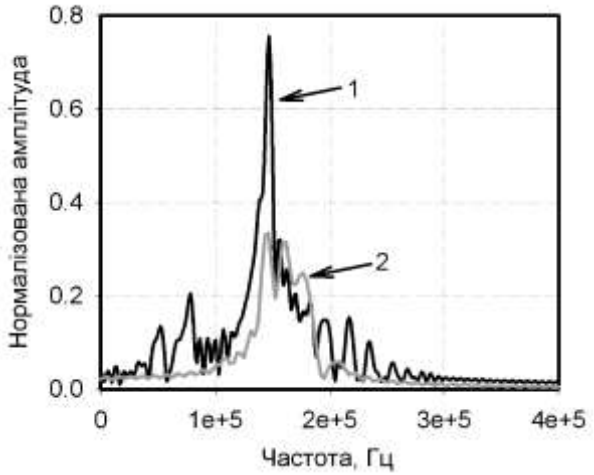


Рисунок 4 – Порівняльний аналіз поширення ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль в стінці труби з дефектом (1) та без нього (2)

Для наочної ілюстрації зроблених припущень приведемо розподіл амплітуд прискорень ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль по товщині стінки труби у досліджуваному сегменті. На цьому рисунку чітко спостерігається нерівномірність розподілу амплітуд прискорень двох ультразвукових хвиль по товщині стінки. У взаємодії з дефектом бере участь лише частина хвилі із певними амплітудно-частотними параметрами, фронт якої падає на його береги. При достатній амплітуді падаючої на береги дефекту ультразвукової спрямованої кільцевої хвилі утворюється відбита хвиля внаслідок вимушених коливань цих берегів [4].

При детальнішому аналізі розподілу амплітуди по товщині стінки труби можна простежити, що частина хвиль має більшу концентрацію енергії по середині стінки, інша – по краях (рис. 5). Тому на дефекти, розташовані в різних місцях товщини стінки труби, будуть реагувати різні частини кільцевої хвилі. Повністю всі моди ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль будуть взаємодіяти тільки із наскрізними дефектами.

Висновки

Проведені дослідження взаємодії ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль із донними дефектами в стінках магістральних трубопроводів показали їх дієвість при застосуванні у неруйнівному контролі.

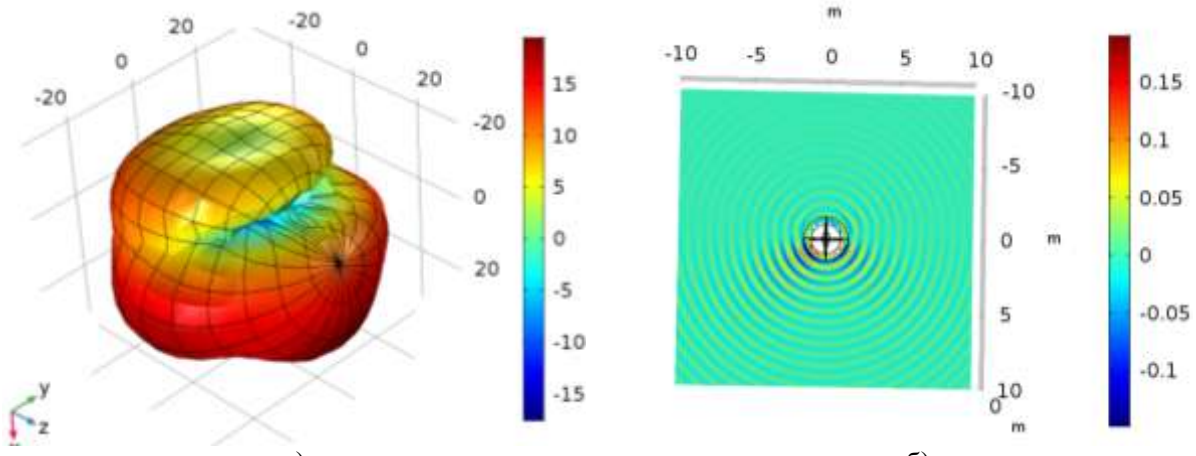
Застосування існуючого підходу, що полягає в моделюванні акустичного поля із неоднорідністю та детальною візуалізацією числових результатів дозволяє в подальшому розробляти засоби контролю, що будуть більш інформативними та простішими в експлуатації.

Література

1 Fong J. 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. – No 22. – P. 213-220. – ISBN 0-7354-0312-0.

2 Nishino H. Simple method of generating for circumferential shear horizontal waves in a pipe and their mode identifications / H. Nishino, K. Yoshida // Acoustical Science and Technology. – 2006. – Vol. 27. – No 6. – P. 389-392. – ISSN 1346-3969.

3 Satyarnarayana L. Circumferential higher order guided wave modes for the detection and sizing of cracks and pinholes in pipe support regions / L. Satyarnarayana, J. Chandrasekarana,



а) б)

а – тривимірний розподіл акустичного тиску в полярних координатах,
б – розподіл зовнішнього акустичного поля у площині xy

Рисунок 5 – Розподіл акустичного тиску

B. Maxfielda, K. Balasubramaniam // NDT & E International. – 2008. – Vol. 41, Issue 1. – P. 32-43. – ISSN 0963-8695.

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. – Vol. 68, Issue 5. – P. 594-602. – ISSN 0003-682X.

5 Лютак І. З. Розробка математичної моделі акустичного поля тріщиною в пружному металічному середовищі / І. З. Лютак // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – С. 31-36.

6 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.

7 Лютак І. З. Контроль технічного стану магістральних трубопроводів кільцевими модами пластинчатих ультразвукових хвиль / І. З. Лютак // Збірник наукових праць. Серія: Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій (Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України). – 2008. – Вип. 13. – С. 193-198.

8 Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Comsol версія 3.5a. - COMSOL Inc., 2017. - 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM) 12 см. - Системні вимоги: Pentium-266; 32 Mb RAM; DVD-ROM Windows 98/2000/NT/XP. – Назва з титул. екрану.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.05.18
Рекомендована до друку професором ***Юрчишиним В.М.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Мельничуком С.І.*** *(Івано-Франківський університет права імені Короля Данила Галицького, м. Івано-Франківськ)*