

5. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЛУЗІ

УДК 004.4:622.24.05

Проф. І.З. Лютак, д-р техн. наук –
Івано-Франківський ТУ нафти і газу

РОЗРОБЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МОД ЛЕМБА

На основі методу скінченних елементів розроблено підхід для обчислення параметрів поширення ультразвукових спрямованих хвиль. Суть підходу полягає в розробленні такої структури даних збереження результатів розрахунків, щоб алгоритм набув властивостей масштабованості та модульності. Наведено основні елементи моделі обчислення поширення ультразвукових спрямованих хвиль. За основу моделі взято реалізований у пакетах скінченного елементного аналізу алгоритм власних коливань із циклічною симетрією. Такий алгоритм є стабільним і верифікованим. Представлено результати розрахунку хвильового числа від частоти для одинадцяти мод (симетричних та антисиметричних).

Ключові слова: ультразвукова хвиля, метод скінченних елементів, моди Лемба, модуль Юнга.

Вступ. Застосування ультразвукових спрямованих хвиль у неруйнівному контролі технологічних об'єктів є одним із найбільших викликів: їх поширення на великі відстані порівняно з об'ємними ультразвуковими хвилями дає змогу перейти на новий якісно вищий рівень контролю, з іншого боку, складність обчислення параметрів їх поширення робить це завдання недоступним для використання в натурних умовах.

Розроблено основні моделі для обчислення параметрів поширення ультразвукових спрямованих хвиль [1]. Науковець Ч.-Х. Сх дослідив спільні та характерні властивості ультразвукових спрямованих та кільцевих спрямованих хвиль при контролі пружних властивостей металу [2]. За результатами його досліджень встановлено, що основною відмінністю ультразвукових спрямованих кільцевих хвиль від ультразвукових спрямованих хвиль є чутливість перших хвиль до радіуса кривизни труби. Основною спільною рисою двох типів ультразвукових спрямованих хвиль є можливість отримувати інформацію про пружні властивості та товщину стінки труби. Додатково ультразвукові спрямовані кільцеві хвилі можна застосовувати для контролю величини радіуса труби. Для визначення пружних властивостей тонких плівок, виготовлених на основі мікро- та наноструктур, науковець Ф. Жанг запропонував фотоакустичний метод [3]. Суть методу полягає в тому, що лазером у тонкій пластині збуджуються високочастотні коливання ультразвукового спектра, що виникають внаслідок різкого розширення пластини від дії температури. Механічні коливання пластини визначаються через пружні властивості матеріалу та величину залишкових напружень.

Як бачимо, застосування ультразвукових спрямованих хвиль для контролю пружних властивостей є перспективним. На сьогодні застосування спрямованих хвиль для контролю пружних властивостей металу перебуває на початку-

вому етапі лабораторних досліджень і теоретичних узагальнень. У цій роботі пропонуємо розробити алгоритм та структуру даних для можливості проводити обчислення та представляти результати.

Модель обчислення поширення ультразвукових спрямованих хвиль. Основна ідея проведення розрахунку поширення МЛ по периметру стінки трубопроводу полягає у застосуванні модального підходу.

Модальний підхід ґрунтується на побудові двовимірної сітки скінченних елементів стінки труби вздовж її осі. Наступним кроком застосовують граничні умови в напрямку, перпендикулярному сітці скінченних елементів. Ці умови визначають періодичний розподіл напружень і деформацій відповідно до умов поширення МЛ в напрямку по периметру труби навколо її осі. Для обчислення просторового періоду розподілу напружень та деформацій застосовують модальний підхід, при якому обчислюються власні числа та вектори коливання побудованої сітки скінченних елементів і реалізується за допомогою існуючого програмного забезпечення. Для побудови моделі скінченних елементів використано циклічні осесиметричні умови розв'язання рівняння власних коливань стінки труби.

Рівняння, що застосовує модальний підхід для опису поширення спрямованих хвиль, представив Л. Гавріч у праці [4], в якій розробив власне програмне забезпечення, що реалізує метод обчислення вільних коливань за допомогою скінченних елементів. Адаптацію математичної моделі поширення спрямованих хвиль Л. Гавріча здійснили науковці у праці [5], що дало змогу застосувати її у існуючих програмах, які реалізують метод модального аналізу.

Рівняння власних коливань. Поле зміщень елементарного об'єму пружного середовища в площині x_1x_2 для хвилі, що поширюється в напрямку x_3 , запишемо так [4]:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3, t) &= U_1(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t)}, \\ u_2(x_1, x_2, x_3, t) &= U_2(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t)}, \\ u_3(x_1, x_2, x_3, t) &= U_3(x_1, x_2) e^{-j(kx_3 - \omega t - \pi/2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

де: j – комплексне хвильове число; k – хвильове число; ω – частота; t – час; $U_1(x_1, x_2)$, $U_2(x_1, x_2)$, $U_3(x_1, x_2)$ – розподіл амплітуд зміщень елементарного об'єму пружного середовища. Будь-яка точка хвилеводу згідно з (1) піддається гармонічним коливанням із частотою ω . Пружні коливання поширюються вздовж осі z із хвильовим числом k із зміщенням по фазі відносно коливань в одній площині поперечного перерізу стінки трубопроводу.

Для опису розподілу енергії по всьому об'єму досліджуваного середовища необхідно просумувати всі члени виразу (1) [4]:

$$(k^2 [K_{11}] + k [K_{12}] + [K_{10}] - \omega^2 [M]) \{u\} = \{0\}, \quad (2)$$

де M – матриця маси. Внаслідок обчислення необхідно віднайти скалярні значення хвильових чисел k_1, k_2, \dots, k_i та відповідні їм вектори переміщень $\{u\}_1, \{u\}_2, \dots, \{u\}_i$ для одного значення частоти ω . Кількість знайдених значень у два рази більша від ступенів свободи розглядуваного пружного середовища.

Метод обчислення поширення спрямованих хвиль Л. Гаврича удосконалив П. Вілкокс для використання у комерційних пакетах скінченних елементів [6]. Метод П. Вілкокса є апроксимацією рівняння (2).

Розв'язок методу власних коливань шукається у такій формі [5, 6]:

$$(i\dot{\mathbf{M}} + i\dot{\mathbf{C}} + \mathbf{K}) = 0, \quad (3)$$

де: \ddot{u} , \dot{u} – відповідно прискорення та швидкість коливань об'єму пружного середовища; \mathbf{M} – матриця маси; \mathbf{C} – матриця демпфування; \mathbf{K} – матриця жорсткості.

Коефіцієнти матриці жорсткості є функціями порядку циклічної симетрії та частоти. Без врахування демпфування рівняння (3) матиме такий вигляд [7]:

$$(i\dot{\mathbf{M}} + \mathbf{K}) = 0. \quad (4)$$

Розв'язок власних коливань сегмента стінки труби (3) та (4) для циклічної осесиметричної моделі є гармонічні рівняння розподілу зміщень елементарного об'єму пружного середовища для знайденої частоти власних коливань ω [5]:

$$u_r = U_r(r, z) \cos k_\theta \theta, \quad u_z = U_z(r, z) \cos k_\theta \theta, \quad u_\theta = U_\theta(r, z) \sin k_\theta \theta, \quad (5)$$

де: r , θ , z – циліндрична система координат; $U_r(r, z)$, $U_z(r, z)$, $U_\theta(r, z)$ – амплітуди розподілу зміщень елементарного об'єму пружного середовища; k_θ – порядок циклічної симетрії.

Застосування (5) узгоджується із властивостями поширення спрямованих хвиль, де зміщення елементарного об'єму пружного середовища у напрямку θ є зміщеним у фазі на 90° від зміщень у площині rz [8]. Підхід дає змогу встановити зв'язок між власними частотами та параметрами поширення МЛ (порядком циклічної симетрії k_θ). Особливістю побудови числової моделі за підходом циклічної симетрії є представлений на рис. 1 сегмент трубопроводу. За основу вибрано циліндричну систему координат φ , ρ , z .

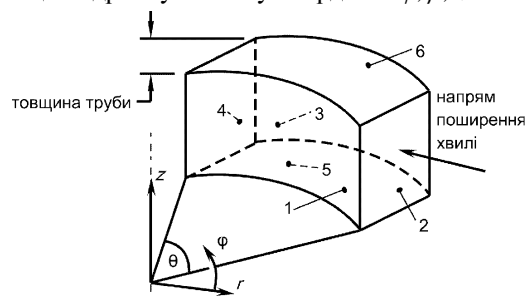


Рис. 1. Сегмент стінки труби для циклічної осесиметричної моделі: межі 1, 3 – відповідно внутрішня та зовнішня стінки труби;

2, 4 – межі сегмента по периметру труби; 5, 6 – межі сегменту по довжині труби

Вісь трубопроводу збігається із віссю z циліндричної системи координат. Величина сегменту труби θ дорівнює

$$\theta = \frac{360^\circ}{k_\theta}. \quad (6)$$

При моделюванні поширення МЛ циклічною осесиметричною моделлю знайдений розв'язок розподілу гармонійних коливань для одного сегмента циклічно повторюється по периметру труби. Це означає, що при поширенні МЛ у стінці труби, число k_θ співвідноситься із кутовим хвильовим числом спрямованої кільцевої хвилі, що визначив І. Вікторов [9]. Зв'язок між довжиною хвилі МЛ та числом циклічної симетрії k_θ є такий [7]:

$$\lambda = 2\pi r_m / k_\theta, \quad (7)$$

де: λ – довжина хвилі МЛ, r_m – радіус труби, взятий до середини товщини стінки.

Граничні умови на межі сегмента труби 5 та 6 (рис. 1) є симетричними. Симетричні граничні умови означають, що переміщення елементарного об'єму середовища стінки сегмента труби є вільними в напрямку, що лежить в площині грані, та дорівнюють нулю в напрямку, перпендикулярному поверхні грані [6]. Симетричні граничні умови на верхній та нижній межах сегмента стінки труби дають змогу шукати розв'язок для хвилі, що поширюється по периметру труби (в напрямку координати φ), без врахування скінченності труби в напрямку осі z [7]. Граничні умови на інших гранях сегмента трубопроводу є вільними (напруження дорівнюють нулю).

Розглянемо поширення МЛ у стінці труби діаметром 273 мм та товщиною стінки 10 мм. Параметри металу виберемо такі: модуль Юнга $E = 207 \cdot 10^9$ Па, коефіцієнт Пуассона – 0,296. Це відповідає константам пружності другого порядку Ляме $\lambda = 11,58 \cdot 10^{10}$ Па, $\mu = 7,99 \cdot 10^{10}$ Па. Хвильове рівняння для МЛ, розв'язане із застосуванням математичної моделі, представимо графічно (рис. 2).

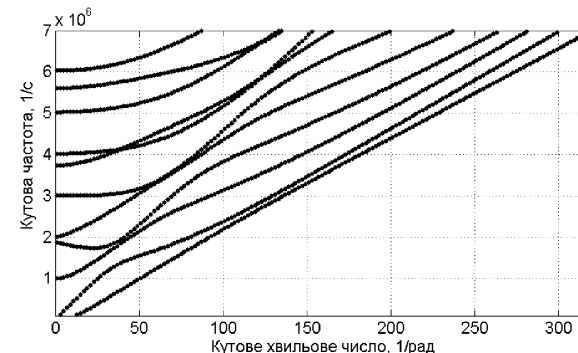


Рис. 2. Дисперсне рівняння кутового хвильового числа поширення МЛ у стінці трубопроводу діаметром 273 мм та товщиною стінки 10 мм

Як бачимо, результати обчислення зберігаються у формі частота – хвильове число, на основі цих даних будуються інші результати: а) частота – фазова швидкість, б) частота – групова швидкість. Для програмної реалізації представлення результатів необхідно відповідну структуру (рис. 3).

Структуру даних розробляли з метою забезпечення масштабованості розрахунків. Так, форма представлення даних обчислюється і зберігається в окремому класі. Первинні математичні дані – дійсна та уявна складові – зберігаються у базовому класі. У цьому ж класі є всі необхідні математичні операції з

комплексними числами. Це дає змогу в подальшому переходити на інші точності представлення даних без зміни основного алгоритму.

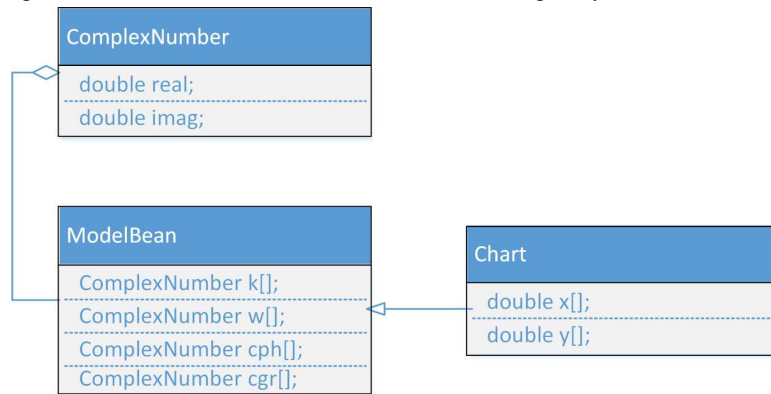


Рис. 3. Структура даних для алгоритму

Алгоритм обчислення складається із таких послідовностей:

1. Введення механічних і геометричних розмірів середовища поширення ультразвукової хвилі.
2. Визначення кроку дискретизації та початкового і кінцевого значень діапазону обчислень.
3. Проведення пошуку кореня на вибраних квадратах координат хвильове число – частота.
4. Запис пошуку кореня в структуру даних.

Висновки. Виявлено, що за допомогою розроблення спеціалізованої структури даних для збереження результатів обчислення алгоритму та представлення результатів у графічних фігурах можна істотно оптимізувати роботу існуючого алгоритму обчислення моделі поширення спрямованих ультразвукових хвиль. Зміна алгоритму дає змогу здійснювати оптимізацію проведення розрахунків шляхом заміни точності представлення числа без впливу на процес пошуку кореня та розбиття площі пошуку на сітку.

Література

1. Мандра А.А. Визначення величини модуля юнга сталей магістральних газопроводів моделюванням методом скінченних елементів поширення ультразвукових мод Лемба / А.А. Мандра, І.З. Лютак, З.П. Лютак // Розвідка та розроблення нафтових і газових родовищ, 2011. – Vol. 4 (41). – С. 66-71.
2. Cheng-Hung Yeh. Characterization of mechanical and geometrical properties of a tube with axial and circumferential guided waves / Cheng-Hung Yeh, Che-Hua Yang // Ultrasonics. – 2011. – Vol. 51. – Issue 4. – Pp. 472-479.
3. Feifei Zhang. Bulk-wave and guided-wave photoacoustic evaluation of the mechanical properties of aluminum/silicon nitride double-layer thin films / Feifei Zhang, Sridhar Krishnaswamy, Carmen M. Lilley // Ultrasonics. – 2006. – Vol. 45. – Issues 1-4. – Pp. 66-76.
4. Gavrić L.J. Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique / L.J. Gavrić // Sound and Vib. – 1995. – № 185(3). – Pp. 531-543.
5. Wilcox P. Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section / P. Wilcox, M. Evans, O. Diligent, M. Lowe, P. Cawley // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2002. – Vol. 21. – Pp. 203-210.

6. Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Comsol версія 3.5 а. – COMSOL Inc., 2009. – 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.

7. Fong K.L.J. A study of curvature effects on guided elastic waves / K.L.J. Fong. – PhD thesis. Imperial College London, 2005. – 209 p.

8. Lowe M.J.S. Matrix techniques for modelling ultrasonic waves in multilayered media / M.J.S. Lowe // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Fr. Contr. – 1995. – Vol. 42(4). – Pp. 525-542.

9. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: Изд-во "Наука", 1966. – 168 с.

10. Rose J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media / J.L. Rose // Cambridge University Press. – 1999. – 476 p.

Лютак И.З. Разработка алгоритма и структуры данных для вычисления параметров распространения ультразвуковых мод Лэмба

На основании метода конечных элементов разработан подход для проведения вычисления параметров распространения ультразвуковых направленных волн. Суть подхода заключается в разработке такой структуры данных сохранения результатов расчетов, чтобы алгоритм получил свойства масштабируемости и модульности. Приведены основные элементы модели вычисления распространения ультразвуковых направленных волн. За основу модели взят алгоритм собственных колебаний с циклической симметрией, что реализован в пакетах конечного элементного анализа. Такой алгоритм является стабильным и верифицированным. Представлены результаты расчета волнового числа от частоты для одиннадцати мод (симметричных и антисимметричных).

Ключевые слова: ультразвуковая волна, метод конечных элементов, моды Лэмба, модуль Юнга.

Lyutak I.Z. The Development of the Data Algorithm and Structure for the Calculation of Eventual Elements of Expansion of Lamb Method Ultrasonic Fashions

The approach for calculating the parameters of propagation of guided ultrasonic waves is designed. The essence of the approach is the development of such data structure to save the results of calculations; the algorithm has acquired properties scalability and modularity. The main elements of the model calculations of ultrasonic directed waves propagation are shown. It is based on models that implement an algorithm in packages with finite element analysis of natural oscillations with cyclic symmetry. This algorithm is stable and verified. The wave number is calculated with frequencies for eleven modes (symmetric and antisymmetric).

Key words: ultrasonic wave, finite element method, lamb modes, Young modulus.

УДК 004.932.2

Асист. Н.В. Пйонтко¹;

проф. М.П. Карпінський², д-р техн. наук

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЧАСТКОВО СПОТВОРЕНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Розроблено інформаційну технологію автоматичної сегментації частково спотворених зображень, яка базується на двох критеріях сегментації: один на базі вейвлет-перетворення, а інший – модифікований критерій на базі сингулярного розкладу матриці. Модифіковано метод сегментації на підставі методу визначення меж шляхом застосування комбінованого критерію. Запропоновано адаптацію методу автоматичної ідентифікації змазаних зображень для ідентифікації типу спотворення сегментів частково спотворених зображень. Оцінено ефективність роботи технології, яка становить 89 %.

Ключові слова: частково спотворені зображення, сегментація, критерії сегментації.

¹ Тернопільський НТУ ім. Івана Пулюя;

² Університет в Бельську-Бялій та Вища державна технічна школа в Новому Сончі (Польща)