

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 621.691.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2022-2(49)-27-35

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ГРУПОВОЇ ТА ФАЗОВОЇ ШВИДКОСТЕЙ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СПРЯМОВАНОЇ МОДИ В СТІНКАХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

І. З. Лютак, З. П. Лютак, М. М. Яцишин, М. Ю. Чернишов

*Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
e-mail: ihorlt@gmail.com*

В роботі представлено алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей ультразвукових спрямованих мод в стінках металевих конструкцій. Представлено теоретичну частину, що математично описує параметри мод ультразвукових хвиль та дає фізичні основи для використання алгоритму. В роботі обґрунтовано необхідність проведення контролю металевих конструкцій на основі магістральних трубопроводів. Показано фотографії нештатних ситуацій, пов'язаних із зсувами ґрунтів, дано аналіз чинників, що впливають на технічний стан металоконструкцій. Обґрунтовано причини здійснення контролю металоконструкцій для з'ясування впливу нештатних ситуацій на зміну рівня технічного стану. Побудований алгоритм обчислення фазових та групових швидкостей ультразвукових спрямованих мод представлено графічно та дано пояснення основних блоків його роботи. Алгоритм реалізовано на мові програмування MatLab, оскільки було обґрунтовано використання мови для проведення складних математичних обчислень та графічного представлення результатів із можливістю подальшого аналізу. Алгоритм складається із компонентів, які реалізовані у вигляді підпрограм, що забезпечує логіку побудови та можливість повторного використання коду програми алгоритму. Алгоритм вирішує математичну задачу пошуку мод ультразвукових спрямованих хвиль у хвилеводі, тому в роботі представлено умови застосування результатів алгоритму для проведення контролю в натурних умовах. Дано опис і послідовність операцій, що потрібно здійснити для успішного конфігурування конструкції із генеруючих та приймальних ультразвукових первинних перетворювачів. Для можливості точкового контролю результатів алгоритму та лабораторних практичних вимірювань параметрів спрямованої хвилі представлено таблицю результатів із числовими значеннями амплітуди хвилі та координат її реєстрації, що дасть змогу більш точно налаштувати лабораторні дослідження. Отримані відхилення результатів у натурних умовах проведення контролю від приведених в роботі дасть змогу більш детально провести аналіз змін технічного стану досліджуваного об'єкту. Наведено висновки результатів досліджень.

Ключові слова: ультразвук, металоконструкції, спрямовані хвилі, неруйнівний контроль.

The paper presents an algorithm for calculating the phase and group velocities of ultrasonic guided modes in the walls of metal structures. The theoretical part is presented, which mathematically describes the parameters of ultrasonic wave modes and provides the physical basis for using the algorithm. The work presents and substantiates the need to control metal structures based on main pipelines. Photographs of unusual situations associated with landslides are shown, and an analysis of the factors is given, which affects the technical condition of metal structures. The reasons for the control of metal structures to clarify the influence of abnormal situations on the change in the level of technical condition are substantiated. The constructed algorithm for calculating the phase and group velocities of ultrasonic guided modes is presented graphically and the main blocks of its work are explained. The algorithm was implemented in the MatLab programming language, as it was justified to use the language to perform complex mathematical calculations and graphically present the results with the possibility of further analysis. The algorithm consists of components that are implemented in the form of subroutines, which provides construction logic and the possibility of reusing the code of the algorithm program. The algorithm solves the mathematical problem of finding

the modes of ultrasonic guided waves in a waveguide, therefore the paper presents the conditions for applying the results of the algorithm for monitoring in real conditions. The description and sequence of operations that must be performed for the successful configuration of the structure from generating and receiving ultrasonic primary transducers are given. For the possibility of spot control of algorithm results and laboratory practical measurements of guided wave parameters, a table of results with numerical values of wave amplitude and coordinates of its registration is presented. That will allow more precise adjustment of laboratory studies. The obtained deviations of the results in the real conditions of control from those given in the work will make it possible to conduct a more detailed analysis of changes in the technical condition of the object under study. The conclusions of the research results are presented.

Key words: ultrasound, metal structures, guided waves, non-destructive testing.

Вступ. Контроль якості металевих конструкцій є самостійною технологічною операцією, яка використовується в різних промислових виробництвах. Це відноситься до контролю металевих конструкцій в нафтогазовій промисловості, літакобудуванні, при будівництві і експлуатації мостів, елементів будь якої промислової індустрії. До останнього часу основними методами контролю металевих конструкцій були радіографія, магнітографія, механічні випробування, візуальний контроль. Основою енергозабезпечення нашої держави є об'єкти нафтогазової промисловості, зокрема магістральні газопроводи. Через низьку оперативність радіографічного контролю, недостатню чутливість і відповідно низьку достовірність результату неможливо своєчасно виявити зміни механічних параметрів металу магістральних газопроводів під дією об'єктивних факторів, а саме через тріщини і зсуви ґрунтів, корозії просідання фундаментів, що може змінювати їх проектне положення, а це в свою чергу може привести до аварійних ситуацій з непередбачуваними екологічними наслідками, рис. 1.



Рисунок 1 – Зсувна ділянка

Використання новітніх технологій при будівництві, застосування більш якісних ізоляційних покриттів металу зовнішньої оболонки газопроводів не вирішує повністю

забезпечення безаварійної експлуатації магістральних газопроводів на окремих ділянках через ґрунтові зсуви, прориви кам'янистими частинками ізоляції особливо в гірській місцевості, що приводить до її пошкодження і зниження корозійної стійкості металу.

Важливим напрямком забезпечення працездатності магістральних газопроводів в нафтогазовій промисловості України, які експлуатуються понад допустимий термін, є одним з пріоритетних напрямків стабільності енергетичної галузі країни. Для забезпечення надійності магістральних газопроводів, які експлуатуються вже тривалий час, потрібно провести аналіз і систематизацію фізичної природи параметрів технічного стану елементів компресорних станцій і, насамперед, лінійної частини газопроводів.

Проблема з забезпеченням надійності магістральних газопроводів на небезпечних ділянках залишається актуальною. На окремих ділянках лінійної частини магістральних газопроводів через зсуви ґрунтів пошкоджується ізоляційне покриття, що вимагає його часткової або повної заміни, рис. 2.



Рисунок 2 – Аварійна ділянка газопроводу

Для визначення працездатності магістральних газопроводів в експлуатаційних умовах

необхідно оцінити напружено - деформований стан металу на небезпечних ділянках, визначити причини, які викликали зміни технічного стану, порівняти отримані дані з допустимими і прийняти рішення.

Основні дослідження поширенню спрямованих ультразвукових хвиль було представлено в праці [1]. Тут автори основну увагу приділили дослідженню поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінках металевих трубопроводів, де досліджували кільцеві моди. Більш загальні дослідження по акустопружності провели автори в працях [2, 3]. Сучасні дослідження в галузі акустопружності направлені на вивчення взаємодії первинних перетворювачів та хвилеводів, що заповнені рідиною [4]. Також для збільшення точності та дослідження нових методів неруйнівного контролю, що базуються на акустопружності, науковці досліджують ефекти впливу температури на зміну результатів вимірювань [5]. Як можна побачити із представлених досліджень неруйнівний контроль напружено-деформованого стану металоконструкцій є сучасним методом, який якісно розвивається і набуває ширшого застосування у промисловості.

Мета роботи. Для збільшення області застосування ультразвукових спрямованих хвиль для неруйнівного контролю є необхідність здійснити дослідження їх параметрів поширення в металевих пластинах, що можуть бути несучими елементами різних металевих конструкцій. Для більш оптимального способу досліджень нами буде використано напрацювання для дослідження поширення ультразвукових спрямованих хвиль в стінках трубопроводів та перенесення отриманих підходів та алгоритмів на металеві конструкції.

Теоретичне обґрунтування. Успішним досвідом використання ультразвукових методів контролю технічного стану магістральних газопроводів є його широке застосування в багатьох суміжних галузях. Трубопроводи, які використовуються в нафтогазовій промисловості для перекачування нафтопродуктів і газу, бувають різного типу, розміру і призначення - прямі ділянки лінійної частини магістральних газопроводів, згинні вставки, кранові вузли перекачуючих агрегатів і

компресорної станції діаметром до 1420мм і товщиною від 16 до 45 мм, виготовлених в залежності від призначення сталі марок Х40 - Х70, 10ГС2, і 16ГС. Дані марки сталі добре піддаються прозвучуванню ультразвуку з невеликим загасанням при поширенні його в металі.

Для визначення напружень у металі стінок магістральних газопроводів використовується у даний час акустичний луно-імпульсний метод контролю [1]. Суть методу полягає у визначенні часу поширення поляризованих ультразвукових хвиль через стінку металу труб газопроводу у двох взаємно-перпендикулярних площинах з одностороннім доступом п'єзоперетворювача до досліджуваної поверхні металу. Даний метод має високу чутливість, але через відносно малу зміну часу поширення ультразвуку через товщину металу не завжди вдається визначити зміну структури металу, а відповідно і деформації. Тому дуже часто визначають частоту автоциркуляції з використанням розробленого пристрою в Івано - Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Метод автоциркуляції дає можливість розширити діапазон контролю металу малих товщин, а також підвищити точність контролю. Для визначення напружено - деформованого стану металу трубопроводу в певному перерізі визначаємо частоти автоциркуляції f_1, f_2 у двох взаємно-перпендикулярних напрямках, за значеннями яких визначають величини напружень.

Найбільш небезпечними напруженнями є поздовжні, набуті внаслідок дії зовнішніх сил і які не завжди можна врахувати при проектуванні та кільцеві напруження, які виникають внаслідок тиску газу, визначаються [1]:

$$\delta_{20} = \frac{3PD}{2\delta}, \quad (1)$$

де δ_{20} – кільцеве напруження, викликане тиском газу P в трубі діаметром D і товщиною стінки δ .

$$\delta_{30} = \frac{PD}{2\delta}, \quad (2)$$

де δ_{30} – поздовжнє напруження труби, викликане дією зовнішніх сил, зокрема зсувом ґрунтів просіданням фундаментів, зміною температур зовнішнього середовища і температури газу, який протікає по трубі.

Площину згину трубопроводу вважаємо відомою. Частота автоциркуляції пов'язана з напруженням через співвідношення [1]:

$$f_3 + f_2 = (\bar{\sigma}_{30} + z\bar{\sigma}_{31} + \bar{\sigma}_2) \frac{f_0}{B} + 2f_0, \quad (3)$$

$$f_3 - f_2 = (\bar{\sigma}_{30} - \bar{\sigma}_2) \frac{f_0}{A} + z\bar{\sigma}_{31} \cdot \frac{f_0}{A}.$$

де f_2, f_3 – виміряні частоти імпульсів автоциркуляції в перерізі труби в поздовжньому і кільцевому напрямках; $\bar{\sigma}_{31}$ – згинне знакозмінне напруження по окружній координаті. Воно виникає у разі просідань та зсувів ґрунтів, а також у разі втрати стійкості трубопроводу; z – відстань точки контролю від перерізу її згину у вертикальній площині; f_0 – частота імпульсів в точці виміру при відсутності навантажень; A, B – константи, які враховують властивості металу труб і, як приклад, вони визначаються на зразках металу шляхом розтягу або стиснення зразків у лабораторних умовах. Вони пов'язані наступним співвідношенням [2]:

$$f = \left[\frac{f_0}{A} \right]^0 + \left[\frac{f_0}{B} \right]^1, \quad (4)$$

де перша складова формули - це значення частоти імпульсів з врахуванням константи A , тобто при відсутності навантажень, а друга складова формули - це значення частоти імпульсів з врахуванням константи B .

Використовуючи залежності зміни частоти автоциркуляції і відповідно швидкостей в двох напрямках контролю, знаходимо напруження в контрольованих точках [3]:

$$\Delta C_{вим} = A(\delta_{20} + \delta_{30}) + B(\delta_{20} - \delta_{30}), \quad (5)$$

де $\Delta C_{вим}$ - виміряна швидкість поширення поперечної ультразвукової хвилі в напруженому стані вздовж труби і в перпендикулярному напрямку.

Дана залежність може бути використана для визначення напружень у довільному напрямку.

Недоліком даної системи контролю є те, що для визначення напружень в перерізі трубопроводу потрібний доступ до даної ділянки, тобто дозволяє контролювати її на відкритих ділянках. На ділянках, де трубопровід знаходиться в ґрунті, потрібне шурфування, що знижує продуктивність контролю, при цьому

можуть виникнути додаткові напруження, а також недопустимі деформації.

Досить ефективним методом, який пропонується, для оцінки зміни напруженого стану металу, визначення дефектів з внутрішньої поверхні металу трубопроводу, а також в місцях, де трубопровід заглиблений в ґрунті, є використання нормальних хвиль, які по своїй фізичній суті є неоднорідними, так званих спрямованих хвиль. Такі хвилі утворюються при нахиленому введенні її в метал, товщина якого співрозмірна з довжиною хвилі. В цьому випадку внаслідок взаємодії падаючої хвилі з багатократним відбиттям хвилі від внутрішньої поверхні металу труби виникають резонансні явища. Вони приводять до утворення нормальних хвиль, які поширюються на великі віддалі вздовж труби і стоячих у перпендикулярному напрямку.

Для визначення фізичної суті поширення спрямованих акустичних хвиль визначають фазову і групову швидкості, які пов'язані між собою співвідношенням [1]:

$$\frac{1}{C_q} - \frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_p} \frac{dC_p}{df}, \quad (6)$$

де C_q - групова швидкість, C_p - фазова швидкість.

Фазова швидкість C_p визначає швидкість поширення хвильового фронту. Вона дозволяє враховувати частоту f ультразвукових коливань і необхідний кут падіння.

Кут, при якому відбувається резонанс падаючої і відбитої хвиль:

$$h \cos(\alpha) = n \left(\frac{\lambda}{2} \right), \quad (7)$$

де h - товщина металу труби; $n = 1, 2, 3, \dots$ і т. д.; λ – довжина хвилі; α – кут падіння хвилі.

Фазова швидкість визначається [1]:

$$C_p = \frac{C_2}{\sin(\alpha)}, \quad (8)$$

де C_2 - швидкість поширення об'ємної хвилі.

Із виразу (8) видно, що фазова швидкість залежить від частоти ультразвуку і товщини металу труби. При n непарному хвилі є симетричними і при n парному - асиметричними.

Групова швидкість C_q характеризує швидкість поширення енергії хвильового фронту імпульсу і визначається [1]:

$$C_q = C_2 \sin(\alpha) = C_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2h}\right)^2} \quad (9)$$

Із виразу (9) видно, що групова швидкість ніколи не перетворюється в безконечність і при $h/\lambda = n(1/2)$ прямує до нуля, в той час, як фазова швидкість прямує до безконечності.

Умови утворення спрямованих хвиль у трубопроводі ускладнюються через наявність у ньому поздовжніх і поперечних хвиль і при відбитті ці хвилі трансформуються одна в іншу, а фаза хвилі при відбитті змінюється на число відмінне не кратне π .

Побудова алгоритму проведення обчислення швидкості поширення спрямованої хвилі. Для практичного використання рівнянь (1) - (9) побудуємо алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей спрямованих хвиль в стінці металевого трубопроводу, рис. 3.

Розроблений алгоритм складається із окремих компонентів, які використовуються як підпрограми, зображені у відповідних блоках. Алгоритм реалізований на мові програмування MatLab. Вибір мови програмування обґрунтовувався широким набором бібліотек математичних функцій, що дозволяє значно спростити пошук коренів характеристичних рівнянь. Другим важливим аргументом, що обґрунтовує вибір пакету MatLab, є детально налаштовувана компонента побудови графіків, що дозволяє не тільки здійснити представлення, але й має набір графічних функцій для подальшого аналізу даних.

Для початку роботи алгоритму необхідно ідентифікувати об'єкт дослідження, наприклад, геометричні розміри трубопроводу та матеріал стінок. В залежності від вибраного досліджуваного об'єкту вибирається робоча частота ультразвукових коливань. Найбільш впливає на вибір частоти ультразвукової хвилі товщина стінки труби. Зі збільшенням товщини стінки труби при однаковій частоті генерованої ультразвукової хвилі збільшується кількість і порядок мод спрямованих хвиль. Збільшення порядкових номерів ультразвукових спрямованих хвиль є небажаним процесом при

проведенні реального контролю, оскільки хвильова енергія не зосереджується в перших модах, а розподіляється між більшою кількістю мод та відповідно зменшується відношення сигнал / завади при реєстрації спрямованої хвилі. Також на вибір частоти ультразвукової хвилі впливає необхідна точність проведення натурних досліджень.

Робота алгоритму є ресурсоємною, і тому було прийнято рішення зробити попередній пошук частотних відрізків у вибраному діапазоні частот, щоб відфільтрувати ті частотні області, які не містять спрямованих хвиль. Для вибраних частотних відрізків застосовуються кілька алгоритмових кроків:

1) Уточнення значення хвильового числа для коренів характеристичного рівняння (існування мод). Точність пошуку задається із міркувань використання ресурсів комп'ютера та точністю натурних досліджень.

2) Здійснюється пошук горизонтально-поляризованих мод ультразвукових хвиль для уточнення наявності інших типів спрямованих хвиль у вибраному частотному діапазоні.

3) Здійснюється аналіз профілю ультразвукових спрямованих хвиль для вибраної товщини стінки трубопроводу з метою ідентифікації мод.

За отриманими наборами значень для знайдених хвильових чисел обчислюються значення фазової та групової швидкостей і будуються графіки. Необхідно зробити зауваження, що для розробленого алгоритму побудова графіків є важливим кроком, що дозволяє аналізувати вибрану частотну область інтегрально та робити рішення щодо використання діапазону поширення ультразвукових спрямованих хвиль.

Алгоритм може обчислювати і загасання амплітуди спрямованої хвилі. Ця можливість може бути реалізована шляхом перетворення хвильового числа в комплексне, де уявна частина відповідатиме за загасання. Необхідно зазначити, що пошук коренів характеристичного рівняння у випадку комплексних чисел вимагає розроблення нового алгоритму, який буде проходити не вздовж однієї осі частоти, а по площині. У випадку комплексного хвильового числа ресурси обчислення значно зростають.

Для використання обчислених результатів на практиці необхідно провести перевірку та

калібрування результатів на пристрої. З цією метою вибрану центральну частоту ультразвукової спрямованої хвилі генерують первинним давачем на зразку у лабораторних умовах та реєструють другим давачем. Калібрування здійснюється вибором найбільш оптимальних кутів нахилу первинних перетворювачів на прийомі та реєстрації ультразвукових коливань. У випадках, коли частота генерованої ультразвукової хвилі є великою для вибраної товщини стінки трубопроводу і в стінці утворюються багато вищих мод, необхідно ставити другий давач на відстані, кратній півхвилі вибраної спрямованої хвилі для підсилення корисного сигналу (моди спрямованої хвилі).

Отриману в лабораторних умовах налаштовану конструкцію із первинних перетворювачів можна використовувати в натурних умовах. Отримані відхилення від лабораторних значень є предметом подальшого аналізу та передумовою для створення рекомендації щодо технічного стану стінки трубопроводу чи ділянки трубопроводу.

Результати. Проведено тензоакустичні вимірювання. На рис. 4 показано значення отриманих напружень у чотирьох перерізах А, В, С, D. Експериментальні значення результатів апроксимовані кубічними поліномами. Як видно з рис. 4, напруження становлять менше ніж 10%

від поздовжніх стискувальних (незалежних від точки в даному перерізі). Для контролю тензоакустичним методом використовувався прилад, розроблений в ІФНТУНГ.

У табл. 1 наведено номінальні дані тривалості проходження ультразвуку в перерізах А, В, С, D. У перерізах А, В тривалість проходження ультразвуку в стінці труби відрізняється від тривалості проходження в перерізах С, D, що свідчить про різну товщину металу труб, а саме 16,5 мм для перерізів А і В і 18,5 мм для перерізів С і D відповідно. За даними, отриманими по кожному перерізу, швидкість проходження ультразвуку в точках перерізу практично однакова, тобто напруження в стінці труби розподілено рівномірно, а отже можна стверджувати, що труби між перерізами В і С мають косий стик. Допустимі напруження, які було встановлені, є визначальним чинником для подальшого проведення ремонтних робіт.

Нами було прораховано акустичний тиск в стінці металевого пружного середовища на окремих точках віддалення від первинного перетворювача, табл. 2.

Результати акустичного тиску із табл. 2 є основою для перевірки (тестування) результатів моделі поширення спрямованої хвилі та натурального експерименту

Таблиця 1 – Тривалість проходження ультразвуку крізь стінку труби

Пе- реріз	Тривалість проходження ультразвуку		Інтервал часу між двома відбиттями, Δt
	5-те відбиття	4-те відбиття	
A	22988	17407	5581
B	22963	17384	5579
C	27153	20535	6618
D	27149	20536	6613

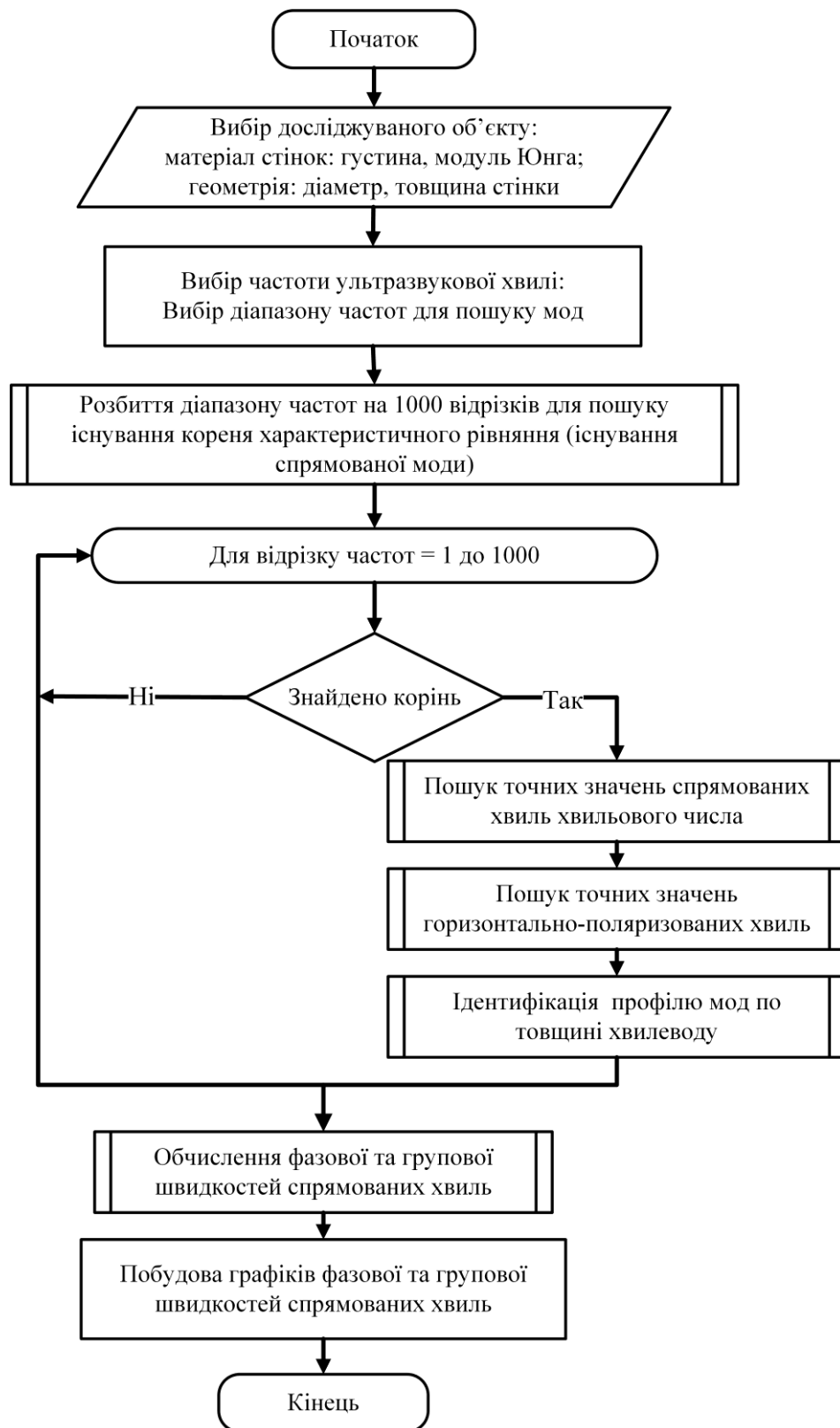
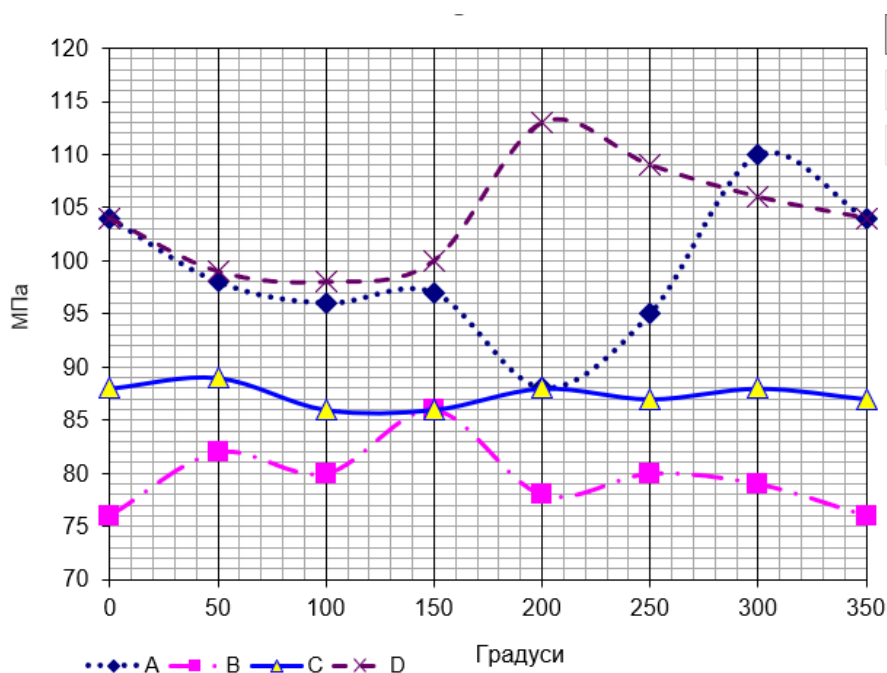


Рисунок 3 – Алгоритм обчислення групової та фазової швидкостей поширення ультразвукової спрямованої моди в стінках металевих конструкцій



Переріз А віддалено від зварного шва на відстань 12 м, а переріз D – на відстань 8,5 м. Перерізи В і С знаходяться безпосередньо в зоні сполучення труб на відстані 0,85 м від зварного шва

Рисунок 4 – Трубопровідні напруження

Таблиця 2 – Акустичний тиск на окремих точках пружного середовища поширення спрямованої хвилі

Координата відстані по довжині труби, м	Координата відстані по товщині стінки труби, м	Акустичний тиск, Па
0.041287	-0.0010099	1.6359E5
0.041287	-0.0022291	1.8713E5
0.041693	-0.0042611	-37826
0.041287	-0.0061576	-30096
0.041558	-0.0090025	-15844
0.041422	-0.010222	1563.2
0.041151	-0.011441	1126.9
0.041151	-0.013067	69680
0.041151	-0.013879	74595
0.046570	-0.013879	-56263
0.046977	-0.011441	-91977
0.046841	-0.010086	-1.1976E5
0.046706	-0.0084606	-1.4811E5
0.046706	-0.0058867	-6029.0
0.046435	-0.0039901	75437
0.046435	-0.0027709	1.2818E5
0.046706	-0.0012808	1.2571E5
0.049686	-0.0010099	-6034.5

Продовження таблиці 2

0.049686	-0.0026355	-36734
0.049821	-0.0042611	-59537
0.049957	-0.0073768	15281
0.049957	-0.0087315	36496
0.049957	-0.011576	55659
0.049957	-0.012931	36796
0.052666	-0.013337	-3787.5
0.053344	-0.011441	-36023
0.053073	-0.0095443	12947
0.052937	-0.0081897	3208.6
0.052937	-0.0062931	-12033
0.052937	-0.0045320	-19273
0.052937	-0.0033128	-5765.4
0.052937	-0.0019581	23005

Висновки. Встановлено, що застосування ультразвукових спрямованих хвиль для контролю технічного стану стінок трубопроводів підвищує точність контролю, оскільки через особливість поширення, хвилею охоплюється об'єм металу стінок в сотні разів більшою, аніж при використанні традиційних методів на основі об'ємних ультразвукових хвиль.

Розроблений алгоритм обчислення фазової та групової швидкостей ультразвукових спрямованих хвиль можна застосовувати для товщин стінок, що на порядок перевищують довжину спрямованої ультразвукової хвилі.

Точність визначення існування спрямованих ультразвукових хвиль для розробленого алгоритму є в прямій пропорційній залежності від використання ресурсів комп'ютера і відповідно повинна регулюватись, виходячи із обчислювальних можливостей.

Список використаних джерел

1. Лютак І. З., Кісіль І. С. Ультразвуковий контроль параметрів технічного стану магістральних трубопроводів. Івано-Франківськ, 2010. 285 с.
2. Cantrell, J. H., and K. Salama. Acoustoelastic characterisation of materials. *International materials reviews*. 1991 36, no. 1. 125 – 145.
3. Man, Chi-Sing, and W. Y. Lu. Towards an acoustoelastic theory for measurement of residual stress. *Journal of elasticity* 1987 17, no. 2 p. 159-182.

4. Wang, Ting-Ting, Yan-Feng Wang, Zi-Chen Deng, Vincent Laude, and Yue-Sheng Wang. Reconfigurable coupled-resonator acoustoelastic waveguides in fluid-filled phononic metaplates. *Composite Structures* 2033 303 p. 116 – 355.

5. Zeng, Shengyang, Jinying Zhu, Bibo Zhong, and Xiongbing Li. Thermo-acoustoelastic effect of Rayleigh wave: Theory and experimental verification. *Ultrasonics*. 2023p 106 – 948.

References

1. Lyutak I.Z., Kisil' I.S. Ul'trazvukovyy kontrol' parametriv tekhnichnoho stanu mahistral'nykh truboprovodiv. Ivano-Frankivs'k, 2010. 285 s. [in Ukrainian]
2. Cantrell, J. H., and K. Salama. Acoustoelastic characterisation of materials. *International materials reviews*. 1991 36, no. 1. 125 – 145.
3. Man, Chi-Sing, and W. Y. Lu. Towards an acoustoelastic theory for measurement of residual stress. *Journal of elasticity* 1987 17, no. 2 p. 159-182.
4. Wang, Ting-Ting, Yan-Feng Wang, Zi-Chen Deng, Vincent Laude, and Yue-Sheng Wang. Reconfigurable coupled-resonator acoustoelastic waveguides in fluid-filled phononic metaplates. *Composite Structures* 2033 303 p. 116 – 355.
5. Zeng, Shengyang, Jinying Zhu, Bibo Zhong, and Xiongbing Li. Thermo-acoustoelastic effect of Rayleigh wave: Theory and experimental verification. *Ultrasonics*. 2023 p. 106 – 948.