

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 534.113:620.179.17:621.643

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-5-23

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ОСОБЛИВОСТІ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ХВИЛЬНОГО ПРОЦЕСУ В ПРОТЯЖНИХ ТРУБОПРОВОДАХ

О. Г. Бондаренко

*Інститут електрозварювання ім.Є. О. Патона НАН України
03650, Київ-150, вул. К. Малевича, 11, e-mail: usndt@ukr.net*

Проблема визначення технічного стану різноманітних трубопровідних систем, забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації останнім часом стала предметом геополітики. В цій ситуації важливе значення для забезпечення працездатності трубопроводів має постійний моніторинг їх технічного стану. Проте, проводити моніторинг технічного стану трубопроводів звичайними методами неруйнівного контролю (НК) технічно складно.

Виконано аналіз сутності хвильового процесу при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями. Наведено види мод спрямованих хвиль та особливості хвильового процесу в твердому середовищі трубопроводу. Розглянуто дисперсні діаграми звукових швидкостей для різних мод спрямованих хвиль, на основі яких сформульовано їх основні особливості при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів. Виконано аналіз хвильового процесу в протяжному трубопроводі з позиції акустичної локації його твердого середовища низькочастотними спрямованими хвилями, розроблено модель активної локаційної системи при діагностуванні технічного стану трубопроводу, розглянуто принципи збудження та зміщення частинок середовища стінки труби при розповсюдженні в ньому поздовжніх, крутильних та згинальних мод низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль.

При виборі частоти та моди спрямованої хвилі для діагностування технічного стану протяжних трубопроводів необхідно враховувати, що спрямована хвиля є результатом взаємодії вібрацій, створюваних перетворювачами, з поверхнею труби. Істотним фактором, що визначає ефективність передачі енергії від антени в тіло протяжного трубопроводу є узгодження внутрішніх опорів перетворювача та навантаження за рахунок статичної сили притискання п'єзоперетворювачів до поверхні труби. При створенні систем низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями необхідно враховувати основні особливості хвильового процесу, який має складний механізм розповсюдження за товщиною стінки труби.

Ключові слова: протяжний трубопровід, хвильовий процес, моди спрямованих хвиль, дисперсійна діаграма.

The problem of determining the technical condition of various pipeline systems, ensuring their reliable and safe operation has recently become the subject of geopolitics. In this situation, constant monitoring of their technical condition is essential for the maintenance of pipelines. However, it is technically difficult to monitor the technical state of pipelines by conventional methods of non-destructive testing (NDT).

An analysis of the essence of the wave process in diagnosing the technical condition of long pipelines by low-frequency ultrasound directed waves is performed. The types of modes of directed waves and peculiarities of the wave process in the solid medium of the pipeline are given. Dispersed diagrams of sound velocities for different modes of directed waves are considered, on the basis of which their main features are formulated in the diagnosis of the technical state of extended pipelines. The analysis of the wave process in the long pipeline from the position of the acoustic location of its solid medium by low-frequency directional waves is made, the model of the active localization system is developed in diagnosing the technical state of the pipeline, the principles of excitation and displacement of the particles of the medium of the pipe wall are considered in the distribution of longitudinal, twisted and bending mods of low-frequency ultrasonic directed waves.

When choosing the frequency and mode of the directed wave to diagnose the technical state of long pipes, it is necessary to take into account that the directed wave is the result of the interaction of the vibrations generated by the transducers with the pipe surface. A significant factor determining the efficiency of energy transfer from the antenna to the body of the drainage pipeline is the harmonization of the internal resistance of the converter and the load due to the static force of pressing the piezoelectric transducers to the pipe surface. When creating systems of low-frequency ultrasonic diagnostics of long-distance pipelines directed waves it is necessary to take into account the main features of the wave process, which has a complicated mechanism of propagation over the thickness of the pipe wall.

Keywords: extended pipeline, wave process, directional wave mode, dispersion diagram.

Проблема контролю технічного стану різних трубопроводних систем, забезпечення надійності та безпечної експлуатації в останнє час стало питанням геополітики. В складній ситуації важливе значення для забезпечення функціонування трубопроводів має моніторинг їх технічного стану. Тем не менше, проводити моніторинг звичайними методами неруйнівного контролю технічно складно.

Проведено аналіз суті хвильового процесу при діагностуванні технічного стану протяжених трубопроводів низькочастотними ультразвуковими напрямленими хвилями. Представлено види напрямлених хвиль і особливостей хвильового процесу в твердій середі трубопроводу. Розглянуто дисперсні діаграми групових швидкостей для різних мод напрямлених хвиль, на основі яких сформульовано їх основні особливості при діагностуванні технічного стану протяжених трубопроводів. Проведено аналіз хвильового процесу в протяженому трубопроводі з позиції акустичної локації його твердій середі низькочастотними напрямленими хвилями, розроблено модель активної локаційної системи при діагностуванні технічного стану трубопроводу, розглянуто принципи збудження і зміщення частинок середі труби при розповсюдженні продольних, крутильних і вигнутих мод низькочастотних ультразвукових напрямлених хвиль.

При виборі частоти і моди напрямленої хвилі для діагностування технічного стану протяжених трубопроводів необхідно враховувати, напрямлена хвиля є результатом взаємодії вібрацій, створюваних преобразувачами з поверхнею труби. Важливим фактором, що визначає ефективність передачі енергії від антени в тіло протяженого трубопроводу є узгодження внутрішніх опорів преобразувача і навантаження за рахунок статичної сили прижимання п'єзопреобразувачів до поверхні труби. При створенні систем низькочастотного ультразвукового діагностування протяжених трубопроводів хвилями необхідно враховувати основні особливості хвильового процесу, який має складний механізм розповсюдження по товщині стінки труби.

Ключові слова: протяжений трубопровід, хвильовий процес, моди напрямлених хвиль, дисперсійна діаграма.

Вступ.

Трубопровідні системи (трубопроводи) знаходять широке застосування в різних галузях промисловості України для транспортування рідких, газоподібних та сипучих речовин і на сьогоднішній день складають значну частину матеріальних активів держави.

Трубопроводи різного призначення в значній та малій мірі належать до об'єктів підвищеної небезпеки, що обумовлено високими робочими тисками транспортованих речовин, складними природно-кліматичними умовами їхньої експлуатації тощо.

Тому проблема визначення технічного стану різноманітних трубопровідних систем, забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації останнім часом стала предметом геополітики. В цій ситуації важливе значення для забезпечення працездатності трубопроводів має постійний моніторинг їх технічного стану.

Проте, проводити моніторинг технічного стану трубопроводів звичайними методами неруйнівного контролю (НК) технічно складно.

В наш час діагностування технічного стану протяжених трубопроводів в основній масі вимушено базується на поняттях та критеріях дефектності металу як зварного шву, так і труби, щоб мати хоча б якісь, нехай непрямі, оцінки поточного технічного стану трубопровідних систем в цілому.

Істотним прогресом в розвитку методів контролю технічного стану трубопроводів є розробка новітньої технології та систем дистанційної акустичної дефектоскопії протяжених трубопроводів методом далекодіючого низькочастотного ультразвукового діагностування (НЧ УЗД) спрямованими хвилями.

Адаптація адекватної технології ультразвукового діагностування та моніторингу

технічного стану протяжних трубопроводів, яким є метод НЧ УЗД спрямованими хвилями, має велике значення для зниження втрат потенційно небезпечних продуктів, які транспортуються зазначеними трубопроводами. В зв'язку зі збільшенням обсягу транспортованих продуктів трубопроводними системами потреба в якісному контролі буде згодом тільки зростати. Великою перевагою НЧ УЗД спрямованими хвилями є можливість 100% охоплення при контролі стінки труби за всією довжиною контрольованої ділянки трубопроводу.

Однак, як свідчить закордонний досвід, створення технічних засобів НЧ УЗД спрямованими хвилями для визначення технічного стану протяжних трубопроводів, ідентифікації результатів контролю та інтеграції технічного стану трубопроводів є досить складною проблемою. Тому, перш за все, спробуємо на основі доступних публікацій в закордонних періодичних виданнях визначити основні особливості низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах.

Сутність хвильового процесу спрямованими хвилями в протяжних об'єктах. Термін «спрямована хвиля» можна визначити як хвильовий процес, що розповсюджується за хвильопровідною траєкторією, яка обмежена фізичними границями поверхонь протяжних об'єктів з однаковою формою їх поперечного перерізу [1,2]. До таких протяжних об'єктів з обмеженими фізичними границями відносяться стрижні, пластини та труби. Для стрижня такою границею виступає його діаметр d , для пластини – її товщина h , а для труби – її товщина стінки t .

Оскільки енергія спрямованої хвилі при розповсюдженні в таких протяжних об'єктах зосереджена в самій конструкції, то вона здатна розповсюджуватись на великі відстані. Завдяки цим ознакам, спрямовані хвилі особливо найліпше підходять для далекодіючого неруйнівного контролю протяжних об'єктів.

Стосовно до неруйнівного контролю протяжних трубопроводів спрямовану хвилю необхідно визначати лише як хвильовий процес, що розповсюджується в трубі по її довжині [2]. Для спрямованої хвилі, що рухається в трубопроводі, її довжина λ значно більша ніж

товщина стінки труби ($\lambda \gg t$), що і відносить її до діапазону низькочастотних коливань.

Відмінною рисою хвильового процесу є поширення енергії, причому в процесі коливань енергія періодично переходить з потенційної до кінетичної та навпаки. Проте, оскільки кожна частка середовища коливається відносно свого положення рівноваги, у хвильовому процесі має місце перенесення енергії без перенесення речовини.

При розповсюдженні спрямованої хвилі по пластині енергія концентрується між нижньою та верхньою поверхнями, а при розповсюдженні по трубі – між внутрішньою та зовнішньою поверхнями труби.

Спрямовані хвилі в трубах можуть бути повздовжніми, згинальними та крутильними (торсіонними). Зазначені типи хвиль розповсюджуються в трубі з різними швидкостями. Достовірні значення швидкості ультразвукових коливань в об'ємі металу труби отримують лише експериментальним шляхом [3]. Швидкість спрямованих хвиль залежить від діаметру труби, товщини її стінки, фізико-механічних властивостей матеріалу, частоти збуджуваного сигналу тощо. При цьому, утворюються моди усіх хвиль, характерною рисою яких є дисперсність, тобто залежність швидкостей поширення від частоти збудження коливань. Тому, в залежності від геометрії та матеріалу об'єкту досліджень, поведіння спрямованих хвиль, при їхньому поширенні, буде принципово різним. Наявність дисперсності спрямованих хвиль спричиняє необхідність відрізнити фазові швидкості (швидкості руху фаз) від групових (швидкості переміщення енергії).

Для з'ясування суті фазових та групових швидкостей розглянемо розповсюдження ультразвукової хвилі в пластині, що має вигляд полоси з координатами x, y, z , яка обмежена поверхнями $x = \pm h$ в напрямку координати x . На відміну від необмежених твердих середовищ, ультразвукові хвилі в такій пластині задовольняють не лише рівнянням пружності, але й граничними умовами на її поверхні. У більшості практичних випадків ці умови зводяться до відсутності механічних напружень на поверхні пластини. Відповідні граничні умови для пластини полягають у рівності нулю компонент напружень T на поверхнях $x = \pm h$ та

бокових гранях пластини, перпендикулярних координатам y та z , тобто

$$T_{xx}|_{x=\pm h} = T_{xy}|_{x=\pm h} = T_{xz}|_{x=\pm h} = 0.$$

На рис. 1 наведено спрощене подання фазової та групової швидкостей хвилі ультразвуку, що розповсюджується в пластині [2].

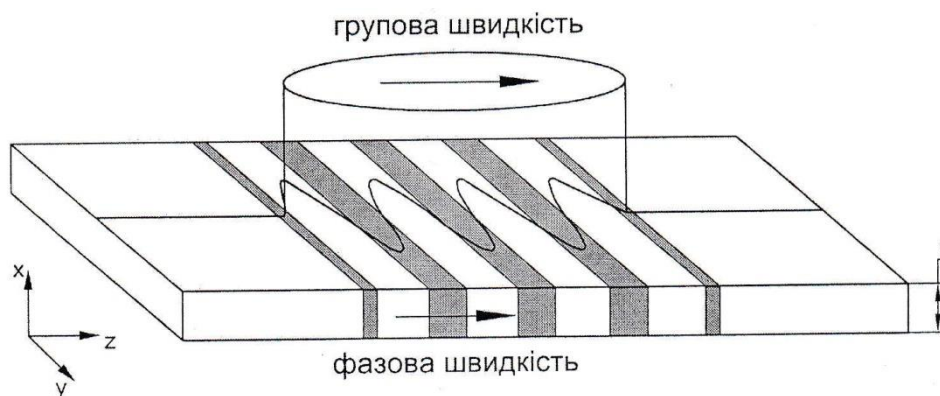


Рисунок 1 – Спрощене подання фазової та групової швидкостей ультразвуку, що поширюється в пластині.

Рисунок уздовж повздовжньої лінії на бічній грані пластини, є фазою стану середовища при стиканні та розтягуванні середовища. Фазова швидкість – це швидкість переміщення фази станів часток середовища, з якою переміщується в просторі фаза плоскої монохроматичної хвилі $y = A \sin \varphi$. Тут A – амплітуда, $\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$ – фаза хвилі (λ – довжина хвилі, x – відстань до джерела хвилі, T – період коливань, t – час). Якщо фаза $\varphi = const$, то фазова швидкість $v = \frac{\lambda}{T}$.

Для характеристики монохроматичної (синусоїдальної) хвилі використовується також поняття хвильового числа:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v},$$

де ω – колова частота хвилі.

Колоподібна пляма на рисунку – це хвильовий пакет, у який, при поширенні, передається енергія хвилі. Швидкість переміщення круглих ділянок є груповою швидкістю u . Групова швидкість $u = dx/dt = d\varphi/dk$ та придатна для опису переносу енергії (передачі сигналу)ю Зв'язок між груповою та фазовою швидкостями хвиль має вигляд:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

У не дисперсному середовищі $dv/d\lambda = 0$ та групова швидкість дорівнює фазовій. Тому

швидкість поширення фази та хвильового пакету не розділяють і називають швидкістю звуку. Якщо ж уважно подивитись на круглі області розповсюджуючої хвилі звичайного ультразвуку, то стане зрозумілим, що рисунок всередині області не змінюється. Не змінюється також форма переданого сигналу та сигналу, прийнятого в точці, що перебуває на певній відстані.

Що ж стосується спрямованих хвиль, то тут має місце значна різниця між фазовими та груповими швидкостями. Наприклад, якщо фазова швидкість більше групової, то рисунок всередині круглої плями буде ніби просуватися вперед всередині кола, а якщо фазова швидкість менше групової, то ніби назад. В результаті прийнятий сигнал здобуває форму, відмінну від форми переданого сигналу. В дійсності спрямовані хвилі поширюються з різною фазовою та груповою швидкостями. Тому дисперсність, найчастіше, спричиняється таким характером їх поширення, при якому кругла область буде ніби розсуватися, витягуючись вперед та скорочуючись назад. Крім того, у випадку спрямованої хвилі виникає безліч мод. Для інтерпретації сигналів від несучих цілностей у трубах необхідно використовувати хвильові моди, що дозволяють ідентифікувати сигнали від дефектів.

Можна побудувати дисперсійні діаграми залежностей фазової та групової швидкостей від частоти для різних мод спрямованих хвиль. Хоча дисперсійна крива фазової швидкості щонайкраще ілюструє теорію спрямованих хвиль [2], у неруйнівному контролі спрямованими хвилями лише зрідка застосовують дисперсійні криві фазових швидкостей. Дисперсійні криві групових швидкостей виражають швидкість спостережуваного хвильового пакету. Ці криві використовують для підтвердження наявності відбитого луно-сигналу від неоднорідностей в трубопроводі за хвильовим пакетом.

Для спрямованих хвиль характерні різні режими розповсюдження та розкладу швидкостей, тому при їх використанні в трубах виникає ряд проблем. Між спрямованими хвилями в трубах та пластинах є багато спільних рис. Як і в пластинах на низьких частотах, коли $\omega h/c \ll 1$, повздовжня хвиля, яка аналогічна симетричним хвилям Лемба, в трубах при $\omega h/c \ll 1$ може розповсюджуватись лише по одній поздовжній хвилі зі швидкістю C . При розповсюдженні в трубі ультразвукових коливань, фазова та групова швидкості повздовжньої моди рівні та визначаються виразом [3]:

$$C_e = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

де E – модуль Юнга; ρ – густина матеріалу труби.

Крутильна мода спрямованої хвилі в трубі повністю аналогічна зсувним хвилям в пластині, які позначаються як хвилі SH-поляризації. Фазова та групова швидкості крутильної моди також рівні та визначаються виразом [3]:

$$C_t = \sqrt{\mu/\rho}, \quad (2)$$

де μ – модуль зсуву.

Згинальні хвилі в трубі аналогічні асиметричним хвилям Лемба, швидкість яких дорівнює [3]:

$$C_q = \frac{\pi t}{\lambda} \sqrt{E/\rho}. \quad (3)$$

Швидкість згинальних хвиль залежить від довжини хвилі (або частоти збуджуваного сигналу) і тому вони є дисперсними.

Моди спрямованих хвиль та особливості хвильового руху в протяжному трубопроводі. Хвильове розповсюдження акустичних коливань за хвилеподібною траєкторією відбувається за умови, коли акустичні пружні

хвилі збуджуються в середовищі, навколо якого речовина має різноманітні акустичні властивості. Одним з таких середовищ є середовище протяжного трубопроводу. Характер хвильового поля в металі стінки труби має достатньо складну структуру. Найбільш істотним є те, що в трубі може існувати декілька фізично незалежних хвиль з різними фазовими та груповими швидкостями їх розповсюдження вздовж всієї труби. Крім того, хвильовий процес в протяжних трубопроводах визначається їх геометричною конфігурацією, властивостями граничних поверхонь, способом збудження акустичних коливань тощо. При зовнішньому впливі на поверхню труби з боку перетворювача збуджується весь спектр можливих на даній частоті хвильових процесів. До особливостей хвильового процесу в протяжному трубопроводі відносять також наявність дисперсії швидкості розповсюдження деяких видів збуджуваних хвиль та розподіл енергії між ними, який залежить від характеру впливу хвильових процесів в трубопроводі та їх просторової структури.

Розглянемо основні моди спрямованих хвиль в обмеженому середовищі протяжних трубопроводів.

Для розуміння сутності спрямованих хвиль вони класифіковані як повздовжні (L-мода), крутильні (T-мода) та згинальні (F-мода). Кожна з цих трьох мод описується з використанням двох параметрів n та m наступним чином: L(0, m), T(n , m), F(n , m), де $n, m = 1, 2, 3, \dots$ [1].

Повздовжня мода записується як L(0, m), де $m = 1, 2$. Перша цифра має нуль, що означає однаково розподілені по колу зсуви частинок та мають лише зсуви середовища за товщиною стінки, які позначені цифрами 1 та 2 в залежності від частоти збудженого сигналу. Тому повздовжня мода низькочастотної спрямованої хвилі є осесиметричною.

Крутильна мода в загальному випадку записується як T(n , m), де $n, m = 1, 2, 3, \dots$. перша цифра в дужках означає ступінь моди, яка відноситься до напрямку по колу, друга цифра – ступінь моди, яка відноситься до напрямку за товщиною стінки. Що стосується параметру n , то для крутильної моди він обмежений нулем, тобто $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Якщо перша цифра нуль, то зсуви частинок середовища, розповсюджуються по колу однаково. Щоб зменшити кількість

крутильних хвиль за параметром m , який впливає на вибір частоти збуджувального сигналу, то при низькочастотному контролі об'єктів спрямованими хвилями цей параметр обрано рівним $m = 1$. У цьому випадку значення частоти крутильної хвилі буде нижче граничної частоти крутильної моди $T(0, 2)$, яка при $m = 2$ складає 245 кГц. Тому при низькочастотному ультразвуковому контролі протяжних об'єктів спрямованими хвилями вибрана крутильна мода $T(0, 1)$. Зсуви частинок середовища при $m = 0$ розповсюджується по колу однаково і така крутильна мода є осесиметричною.

Згинальна мода записується як $F(n, m)$, де $n, m = 1, 2, 3, \dots$. Згинальні моди вміщують всі складові частинок середовища – за колом, товщиною стінки труби та віссю. Це означає, що згинальна мода спрямованих хвиль є асиметричною.

На рис.2 наведені схеми зсуву частинок середовища труби в залежності від параметра n

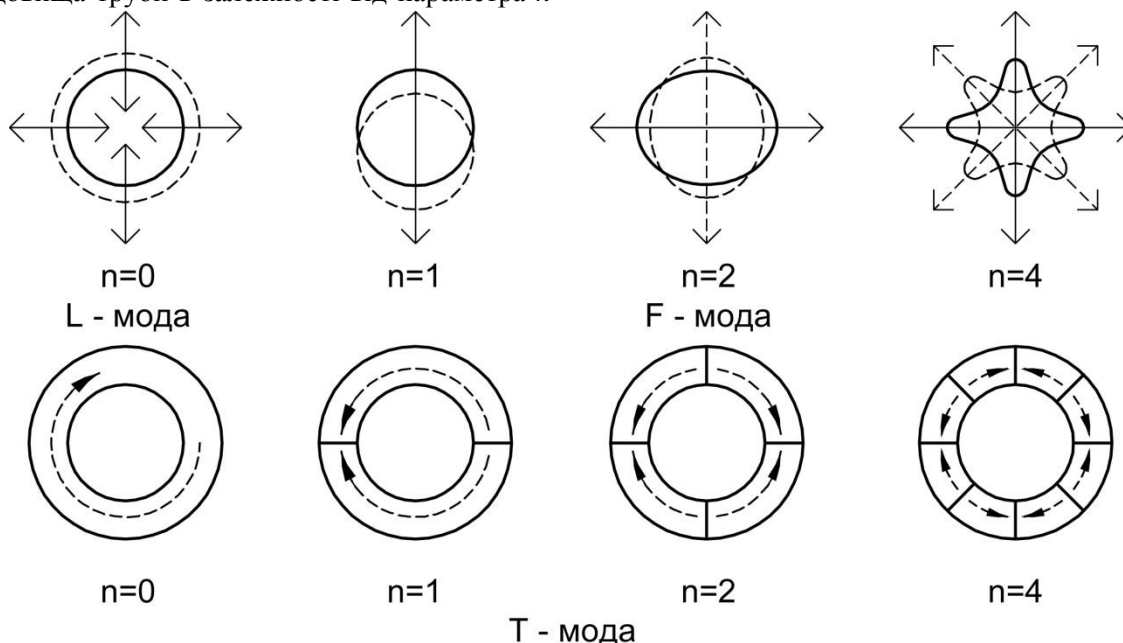


Рисунок 2 – Схеми зсуву частинок середовища труби в залежності від параметра n для повздожньої, згинальної та крутильної мод спрямованої хвилі.

В якості відправної точки при розгляді хвильового процесу пружних коливань спрямованих хвиль у твердому трубопроводі та напрямків зміщення частинок середовища труби будемо використовувати звичайну циліндричну

для повздожньої, згинальної та крутильної мод спрямованої хвилі [1].

Для L- та F-мод спрямованих хвиль зсув частинок середовища по колу труби відбувається по її лицевій поверхні із зовнішньої сторони. Що стосується зсуву частинок середовища по лицевій поверхні із внутрішньої сторони, то коливання будуть асиметричними відносно зсуву з зовнішньої, якщо параметр m цих мод спрямованих хвиль має непарне значення, та симетричними, якщо він має парне значення. При відсутності зсуву частинок за колом труби для згинальної F-моди число вузлів (або число пучностей) зсувів частинок середовища передається числом $2n$. При відсутності зсуву частинок середовища по колу лицевій поверхні зовнішньої та внутрішньої сторін труби для T-моди спрямованої хвилі число вузлів зсуву частинок у тулу труби також передається числом $2n$.

систему координат з радіальною r , кутовою φ та осьовою z координатами [4]. Виходячи з цього на рис. 3 наведено фрагмент труби в циліндричній системі координат.

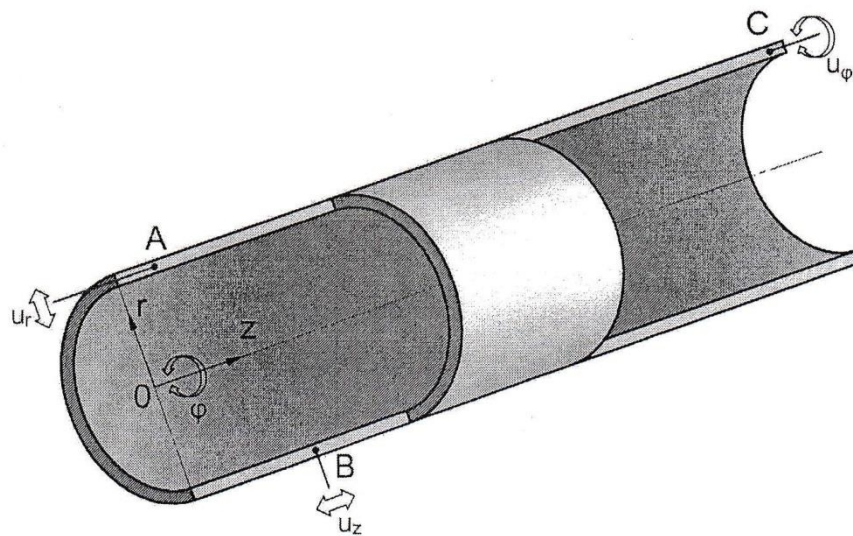


Рисунок 3 – Фрагмент труби в циліндричній системі координат.

Будемо вважати, що хвильовий рух розповсюджується в додатному напрямку осі z . Компонента зміщення частинок середовища в точці A труби вздовж радіальної координати r позначена u_r , в точці B вздовж осьової координати z позначена u_z , а в точці C за кутовою координатою φ позначена u_φ .

Виходячи з рис.3 повздовжні хвилі в трубопроводі характеризуються однією компонентою зміщення u_r частинок середовища в напрямку координати r та однією компонентою зміщення u_z частинок середовища при розповсюдженні спрямованої хвилі вздовж координати z та, таким чином, не залежить від кутової координати φ . Розповсюдження повздовжньої хвилі в напрямку координати z здійснюється завдяки знакозмінним стисненням та розтягам частинок середовища труби за координатою r .

Крутильні хвилі в трубопроводі характеризуються однією компонентою кутового зміщення u_φ частинок середовища в напрямку, перпендикулярному осі труби, та однією компонентою зміщення u_z частинок середовища при розповсюдженні спрямованої хвилі вздовж координати z . Компонента кутового зміщення u_φ частинок середовища коливається вздовж кола труби, володіє симетрією осі z та не залежить від радіальної координати r .

Згинальні хвилі в трубопроводі характеризуються всіма трьома компонентами зміщення u_r , u_z , u_φ частинок середовища труби. В цьому полягає одна з основних відмінностей згинальних мод спрямованої хвилі в трубопроводі від повздовжніх та крутильних мод спрямованої хвилі. Для згинальних мод хвиль, які вміщують деформації повороту u_φ та деформації стиснення та розтягу u_r частинок середовища труби, характерно згасання згинальної моди спрямованих хвиль в напрямку координати z внаслідок зміни фазової швидкості в залежності від частоти. Тому згинальні моди спрямованих хвиль є дисперсними.

Таким чином, в ізотропному твердому тілі з ідеальними межами, яким є протяжний трубопровід, повний хвильовий рух можна представити як суперпозицію основних рухів. Для повздовжніх та крутильних мод спрямованих хвиль в трубопроводі при їх описі достатньо лише двох основних рухів. Для опису згинальних мод спрямованих хвиль в трубопроводах необхідно три основні хвильові рухи.

Теоретично зміщення часток середовища в кожній довільній точці всередині труби протяжного трубопроводу можна представити накладанням порядкових мод спрямованих хвиль, позначених nm , та записати формулою наступного виду [2]:

$$u_x = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_{x_{nm}} N_{x_{nm}}(r) \exp(in\varphi - ikz) \exp(-i\omega t) \quad (4)$$

де: u_x – зміщення частинок середовища у певному напрямку ($x = r, \varphi, z$);

φ – кутова координата (кут у радіанах);

z – відстань уздовж вісі протяжного трубопроводу;

r – радіальна координата;

$A_{x_{nm}}$ – амплітуда спрямованої хвилі nm ;

$N_{x_{nm}}$ – функція розподілу в напрямку r ;

K_{nm} – хвильове число моди nm ;

$l = 1, 2, 3, \dots$

ω – колова частота збуджуваної хвилі;

t – час.

Наведений вираз (4) відомий як теоретична формула для опису спрямованої хвилі. Порядок кожної моди n та m у формулі (4) відповідає позначенням мод n та m , що наведені на рис.2, та використовуються для всіх мод $L(n, m)$, $F(n, m)$ та $T(n, m)$. Спосіб розкладання за формулою (4) прийнято називати «розкладанням нормальної моди» (розкладанням власних коливань), тому що в цьому випадку застосовується нормальна функція. Тому спрямовані хвилі відносяться до нормальних хвиль, форма яких не змінюється при розповсюдженні в протяжному трубопроводі. У виразі (4) значення $N_{x_{nm}}$ та K_{nm} можна отримати, знаючи зовнішній та внутрішній діаметри трубопроводу та фізико-механічні властивості матеріалу. Амплітуду $A_{x_{nm}}$ можна отримати, визначивши режим збудження коливань (сигналу).

Існують спільні риси в характері розповсюдження спрямованих хвиль в пластині та трубі, проте однією з відмінностей є те, що хвильовий рух в нескінченній пластині є двомірним, на відміну від труби, де хвилі можуть рухатись не лише за двома вимірами, а й за трьома. Ця відмінність стає очевидною для згинальних хвиль, які у випадках пластини та труби відрізняються як за числом типів, так і за кількістю компонентів зміщення частинок середовища труби.

Дисперсійні діаграми низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль. В межах особливостей хвильового процесу в протяжному трубопроводі необхідно розглянути дисперсійну діаграму, яка показує залежність між груповою швидкістю звуку та частотою збуджуваного сигналу. Дисперсійні криві групових швидкостей виражають залежність хвильового пакету (імпульсу), що спостерігається, від частоти, тому їх можна використовувати для підтвердження наявності відбитого луносигналу за хвильовим пакетом.

Дисперсійні криві залежностей групових швидкостей від частоти L-, T-, та F-мод спрямованих хвиль для труб діаметром 6 дюймів, побудовані за допомогою комп'ютерної програми, наведені на рис. 4 [5].

Криві ілюструють наявність незначної дисперсії для нульової повздовжньої моди $L(0,1)$ у визначеному діапазоні частот та відсутність дисперсії нульової повздовжньої моди $L(0,2)$ у відповідному діапазоні частот низькочастотної спрямованої хвилі. Для крутильної моди $T(0,1)$ спрямованої хвилі дисперсність відсутня у всьому діапазоні частот. Згинальні F-моди спрямованих хвиль володіють значною дисперсією у всьому діапазоні частот. На рис. 4 наведено ціле сімейство згинальних хвиль. Воно включає в себе подвійну нескінченність хвиль в тому розумінні, що при кожному значенні параметра n існує нескінченний ряд хвиль, які відрізняються постійною розповсюдження m . Жодна згинальна хвиля не прямує до нуля. Найнижчу частоту мають хвилі зі значеннями $n = 1$. Зі зростанням параметра n починає зростати й найнижча частота згинальної хвилі.

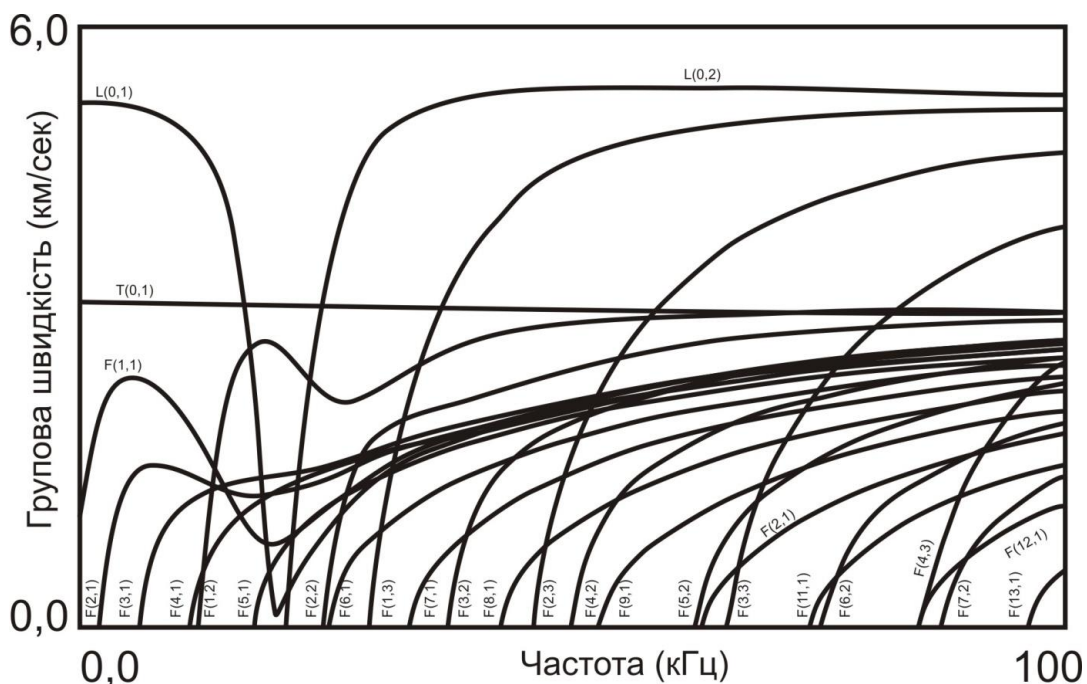


Рисунок 4 – Дисперсні криві залежностей групових швидкостей від частоти для різних мод спрямованих хвиль в трубопроводах.

Таким чином, дисперсність низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль при розповсюдженні вздовж протяжного трубопроводу та викликає чимало ускладнень при виконанні неруйнівного контролю. При роботі в діапазоні низьких частот з високою дисперсністю складно аналізувати форму відбитого сигналу, тому прагнуть використовувати бездисперсійну область. За дисперсійною діаграмою визначають існування мод хвиль з різною груповою швидкістю звуку навіть на одній частоті.

На розкид групових швидкостей спрямованої хвилі в трубі впливає її геометрична форма, для характеристики якої використовують відношення товщини t стінки труби до величини зовнішнього діаметру D_3 , тобто t / D_3 . В залежності від значень цього відношення труба може приймати форму круглого стрижня або пластини. Так, при $t / D_3 = 1/2$ труба має форму стрижня круглого перерізу без внутрішнього отвору посередині. По мірі зменшення значення t / D_3 труба стає тонкостінною, а при $t / D_3 \rightarrow 0$ це вже не труба, а пластини.

В залежності від значень відношення t / D_3 для труб розкид групових швидкостей

спрямованих хвиль буде різним. На рис. 5 в якості прикладу наведені дисперсійні криві залежностей групових швидкостей від частоти для поздовжньої та крутильної мод спрямованих хвиль в трубах малого діаметра [6].

Дисперсійні криві на рис. 5 для труб діаметром 12,7; 19,1 та 24,5 мм при товщині стінки відповідно 1,0; 1,5 та 1,96 мм побудовані таким чином, що відношення $t / D_3 = 0,08$. Як можна помітити, криві дисперсії хвиль L(0,1), L(0,2) сильно відрізняються в залежності від частоти та розміру труб, тобто від їх діаметру та товщини стінки. Області частот, в яких поздовжня мода не є високодисперсною та може застосовуватись для неруйнівного контролю, мають або дуже низьку частоту (мода L(0,1) на частоті до 20кГц), щоб володіти достатнім діапазоном при виявленні несучільностей, або дуже високу частоту (мода L(0,2) на частоті вище 100 кГц), щоб володіти достатньою чутливістю. Ці області частот також є різними для різних розмірів труб. Крім того, в області частот, де є поздовжні моди L(0,1), L(0,2), стає складніше контролювати спрямовані хвилі цих мод.

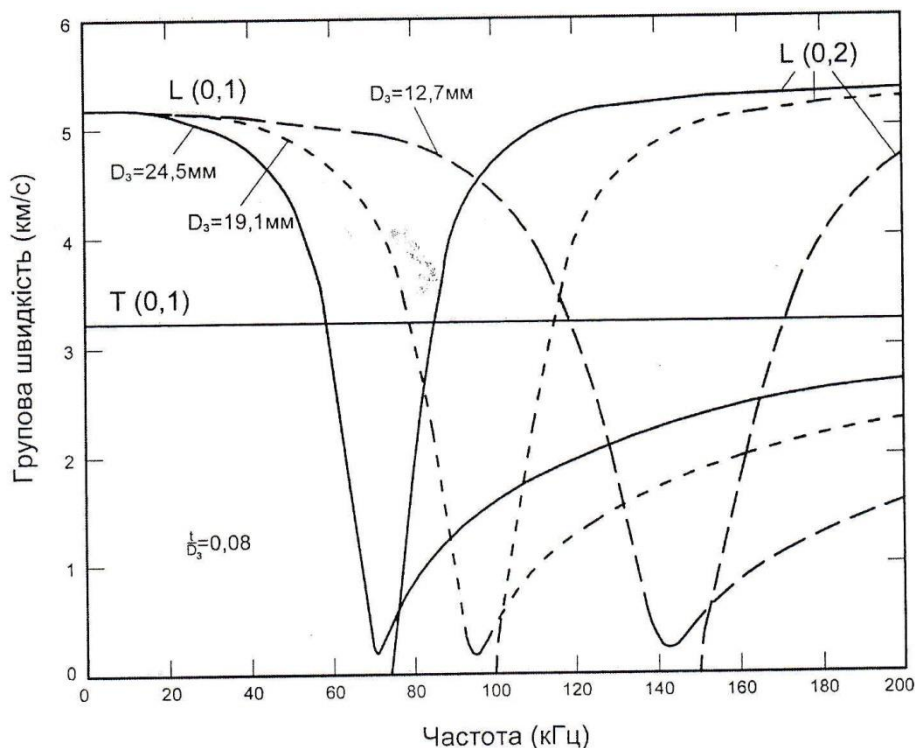


Рисунок 5 – Дисперсійні криві залежностей групових швидкостей від частоти для поздовжньої та крутильної мод спрямованих хвиль в трубах малого діаметру.

Дисперсійні криві на рис.5. демонструють, що при збільшенні зовнішнього діаметра труби дисперсійні криві поздовжньої моди $L(0,1)$, $L(0,2)$, змішуються в більш низький діапазон частот. Якщо для труб діаметром $D_3 = 12,7$ мм дисперсійна крива поздовжньої хвилі $L(0,2)$ розпочинається в районі частот 150 кГц, то вже для труби $D_3 = 24,5$ мм дисперсійна крива цієї моди розпочинається в районі частот близько 75 кГц. Це підтверджується дисперсійними кривими для 6-ти дюймових труб (рис.4), коли дисперсійна крива поздовжньої моди $L(0,2)$ розпочинається в районі близько 25 кГц.

Крива дисперсії крутильної моди $T(0,1)$ спрямованої хвилі є прямою лінією та не змінюється при зміні частоти або розмірів труб. Тому крутильну хвилю легше контролювати та використовувати в довільній області частот. Дисперсійні криві демонструють, що крутильна мода володіє властивостями, які роблять її ідеальною для дистанційного контролю спрямованими хвилями та краще підходить для контролю труб різного діаметру в порівнянні з

поздовжньою модою спрямованої хвилі, в тому числі і для труб малого діаметру, наприклад, труб теплообмінників. Крутильну моду краще застосовувати в компромісному випадку, коли потрібно забезпечити необхідний рівень чутливості та діапазон контролю. В той же час при виборі частоти крутильної моди необхідно керуватись, з одного боку вимогами максимальної чутливості до малорозмірних дефектів (що вимагає збільшення частоти збуджуваного сигналу), а з іншого – збільшення діапазону контролю (що вимагає зменшення частоти сигналу).

Наведені на рис. 4 та 5 дисперсійні криві демонструють, що зміни групових швидкостей спрямованих хвиль в протяжних трубопроводах залежать від зміни частоти, моди хвилі, діаметру та товщини стінки труби. Тому параметр дисперсності грає вирішальну роль при використанні спрямованих хвиль для діагностики технічного стану трубопроводів, оскільки вона припускає спотворення сигналу у часі.

Криві дисперсії, зображені на рис.4 та 5 – це криві для конкретного діаметру труби та

товщини стінки. При цьому, криві дисперсії на рис.4 ілюструють ряд відповідних характеристик:

1. З підвищенням частоти збільшується кількість присутніх мод спрямованих хвиль;

2. Крутильна Т-мода не є дисперсійною. Її швидкість залишається сталою при зміні частоти;

3. При нульовій частоті існують моди L(0,1), T(0,1), D(1,1), на крайній випадок, теоретично;

4. Повздовжня хвиля L(0,1) є високодисперсною на низьких частотах. Її частота швидко прямує до нуля, перш ніж плавно підвищитись при подальшому зростанні частоти;

5. Повздовжня хвиля L(0,2) має граничну частоту в районі 25 кГц, а потім її швидкість стрімко зростає до плато;

6. Згинальна хвиля F(1,3) має набагато вищу граничну частоту, а потім їх швидкість повільно зростає до плато, подібно хвилі L(0,2).

Таким чином, виходячи з аналізу наведених на рис.4 та 5 дисперсійних кривих впливає важлива аксіома: **для кожного сполучення «товщина стінки – діаметр труби» існує своя окрема родина кривих дисперсій.**

Дисперсійні криві грають важливу роль при калібруванні А-скану, проведення якого для спрямованих хвиль є складним питанням, що вимагає наявності математичного забезпечення для «зчитування» швидкості на кривій дисперсії для відповідної труби при обраній частоті проведення контролю. Враховуючи, що товщина стінки труби залежить від діаметру труби, призначення труб, то для попереднього вибору робочої частоти збуджуваного сигналу користуються добутком частоти на товщину стінки труби, тобто $f \cdot t$. В якості вихідного значення цього добутку для розрахунку робочої частоти збуджуваних сигналів низькочастотної спрямованої хвилі при неруйнівному контролі протяжних трубопроводів використовується співвідношення $f \cdot t \leq 1$ (мм·МГц).

Фактично з цього співвідношення впливає умова вибору частоти збуджуваного сигналу при проведенні контролю протяжних трубопроводів. З урахуванням наведеного співвідношення в залежності від товщини t стінки труби та побудованих дисперсійних

кривих (рис.4, 5) для труб різних діаметрів повинна визначатись частота зондуючого сигналу низькочастотної не дисперсійної спрямованої хвилі відповідної моди з відомими властивостями. Лише таким чином можна досягти заданого результату за діапазоном розповсюдження спрямованої хвилі на великі відстані з мінімальним згасанням та високою чутливістю, а також отримати необхідні дані про фактичні втрати металу труби за відповідними відбитими луно-сигналами від несутільностей трубопроводу. Такі умови дозволять генерувати в трубопроводі лише одну моду спрямованої хвилі.

Хвильовий процес як спосіб акустичної локації середовища протяжного трубопроводу. Як вже зазначалося, низькочастотні хвилі при розповсюдженні в середовищі протяжного трубопроводу призначені для виявлення несутільностей в поперечному перерізі труби серед різноманітних відбивачів в структурі трубопроводу. Якщо розглянути, що всі відбивачі в трубопроводі є об'єктами, місцезнаходження яких необхідно визначити за допомогою низькочастотних спрямованих хвиль, то хвильовий рух в трубопроводах базуватиметься на фундаментальному понятті акустичної локації. В загальному випадку акустична локація – це визначення місцезнаходження об'єкта за допомогою аналізу звуку, що відбивається від об'єкту (активна локація) або випромінюється цим об'єктом (пасивна локація).

За допомогою акустичних хвиль фактично здійснюється акустична локація сторонніх тіл або меж поділу середовища. Діапазон акустичних хвиль, що взаємодіють з різними речовинами лежить від найнижчих (умовно 0 Гц) до гранично найвищих $10^{12} - 10^{13}$ Гц і тому вони застосовуються для отримання інформації, що базується на відбитті пружних коливань та хвиль на межі між різними середовищами.

Спосіб акустичної локації використовується як в діапазоні звукових, так і в діапазоні ультразвукових частот, що й визначило термін звукової та ультразвукової локації [11]. Звукова локація відома виключно під терміном «гідролокація», оскільки звукові хвилі є єдиним відомим на сьогоднішній день видом хвильового розповсюдження на великі відстані

в природному середовищі без значного послаблення. В гідролокації за швидкістю розповсюдження звуку в воді та проміжками часу між моментами випромінювання та приймання відбитого сигналу визначають відстань до об'єкта, а за напрямком прибуття відбитого сигналу – напрямком на об'єкт (підводний човен, корабель, косяк риб тощо).

За аналогією гідролокації хвильовий рух в протяжному трубопроводі можна розглядати як метод активної ультразвукової локації середовища трубопроводу з використанням низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль, які в даному випадку розповсюджуються в одному напрямку вздовж вісі труби та відбиваються назад при наявності різноманітних відбивачів в структурі трубопроводу, включаючи несучільності в поперечному перерізі труби.

Фактично на основі методу активної ультразвукової локації базуються всі методи ультразвукової дефектоскопії в неруйнівному контролі з використанням різноманітних пружних хвиль в широкому частотному діапазоні. Для діагностування технічного стану різноманітних об'єктів крім активної

ультразвукової локації широке застосування отримав метод пасивної ультразвукової локації (акусто-емісійний метод або АЕ метод).

АЕ метод на основі пасивної ультразвукової локації широко застосовується для діагностування технічного стану матеріалів різноманітних промислових об'єктів, в тому числі й складної геометрії та на ділянках, доступ до яких ускладнений. Для цього використовуються так звані локальні антени, які складаються з різних груп давачів. Так, наприклад, для АЕ діагностування технологічних трубопроводів, в залежності від їх форми використовуються три локальні антени, для яких обрано лінійні режими локації [12].

Метод пасивної локації також застосовується для пошуку витоків продуктів з різноманітних трубопроводів, який базується на лінійному способі розміщення акустичних давачів на контрольованій ділянці трубопроводу та кореляційному методі обробки акустичних сигналів [13, 14].

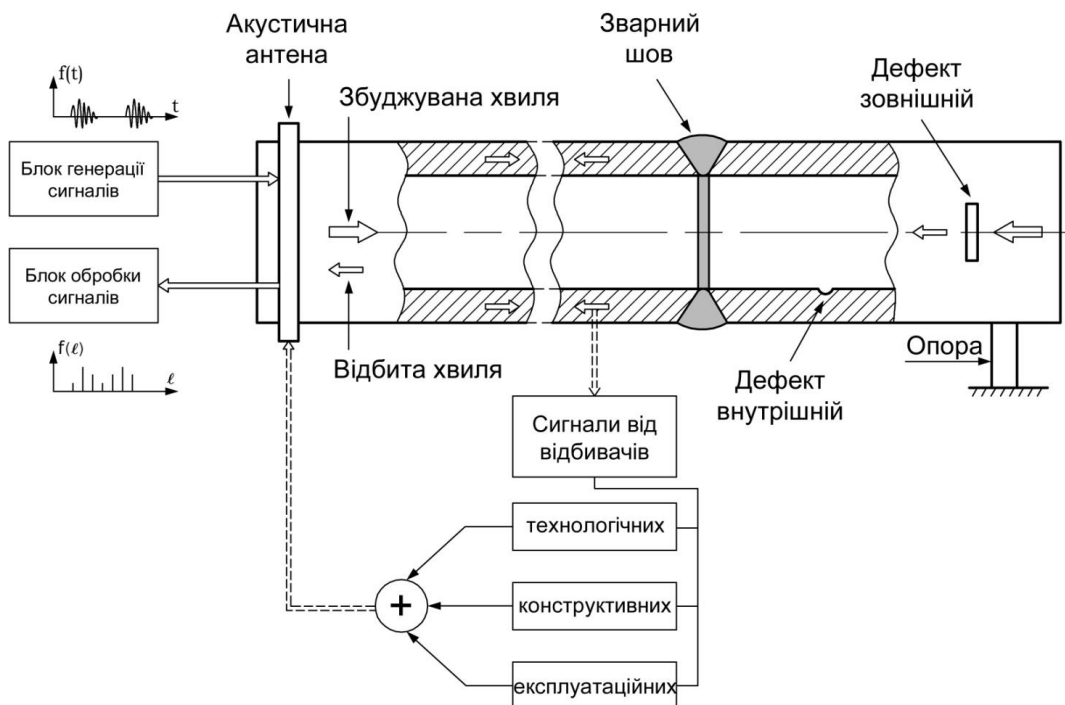


Рисунок 6 – Модель активної локаційної системи при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів.

Процес технічного діагностування стану протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями відноситься до активної локації, коли середовище трубопроводу за допомогою системи п'єзоперетворювачів піддається спеціальній стимулюючій дії, в результаті якої в трубопроводі збуджуються ультразвукові коливання.

На рис. 6 наведено модель активної ультразвукової локації системи при діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів.

Модель побудована виходячи з припущень, що характеристики відбивачів трубопроводу та відстань до них від точки збудження сигналів та приймання луно сигналів залишаються незмінними в процесі ультразвукової локації середовища трубопроводу спрямованими хвилями.

Основний принцип ультразвукової локації протяжних трубопроводів полягає в перетворенні енергії збудження блоком генератора імпульсних сигналів в коливання частинок середовища трубопроводу, які й визначають реакцію трубопроводу при наявності в них технологічних, конструктивних та експлуатаційних відбивачів. В результаті реакції трубопроводу в місцях розташування відбивачів виникають відбиті імпульсні сигнали, які несуть інформацію про місцезнаходження та розміри несучильностей трубопроводу. Блоком обробки сигналів здійснюється ультразвукова візуалізація відбивачів трубопроводу, тобто отримання послідовності акустичних зображень несучильностей трубопроводу у вигляді максимальних значень обгинних амплітуд відбитих сигналів, розміщених на різних відстанях в залежності від часу їх надходження.

Амплітуди відбитих сигналів залежать від характеристик відбивачів, кожен з яких має свою поверхню відбиття. При цьому кожен відбивач можна вважати точковим по відношенню до огинної відповідного відбитого імпульсу.

Фундаментальною основою ультразвукової локації протяжних трубопроводів є те, що збудження зондуючих імпульсів та приймання відбитих сигналів здійснюється одними й тими

ж п'єзоперетворювачами, які розміщені в одній точці по колу трубопроводу. В такій системі ультразвукової локації реалізується одновимірний вектор положення відбивачів, тобто зондування здійснюється за однією координатою вздовж поздовжньої осі трубопроводу та локалізується в ньому як у хвилеводі. Тому системи ультразвукової локації протяжних трубопроводів з використанням низькочастотних спрямованих хвиль відносяться до класу інформаційно-вимірювальних систем.

Принципи збудження та просторове розповсюдження різних мод спрямованої хвилі. При діагностуванні технічного стану протяжних трубопроводів з використанням низькочастотних спрямованих хвиль застосовується активний метод ультразвукової локації.

Для збудження спрямованих хвиль в протяжних трубопроводах та приймання відбитих від несучильностей труб сигналів можуть використовуватись різні типи випромінювачів: п'єзоелектричні, магніострикційні та електромагнітоакустичні [15].

Найчастіше при неруйнівному контролі протяжних трубопроводів використовуються кільцеві акустичні локаційні антени на основі необхідної кількості п'єзоперетворювачів, які рівномірно розміщуються по колу труби в одній площині її поперечного перерізу за допомогою механічного бандажу або надувного кільця. При проведенні контролю п'єзоперетворювачі щільно притискаються до поверхні труби за допомогою механічного зусилля або шляхом прикладання тиску повітря більше 10 кг.

В залежності від моди спрямованої хвилі, що використовуються для неруйнівного контролю протяжних трубопроводів, п'єзоелементи перетворювачів акустичної антени збуджуються у відповідному напрямку. На рис.7 наведено принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени та напрямок хвильового руху при розповсюдженні поздовжньої моди спрямованої хвилі [16]. Із поздовжніх мод спрямованих хвиль найбільш прийнятною модою є швидкорухома нульова поздовжня мода $L(0,2)$, швидкість якої не залежить від частоти в діапазоні частот вище 20

кГц на відміну від поздовжньої моди $L(0,1)$, для якої дисперсія, хоч мала, але все ж таки існує.

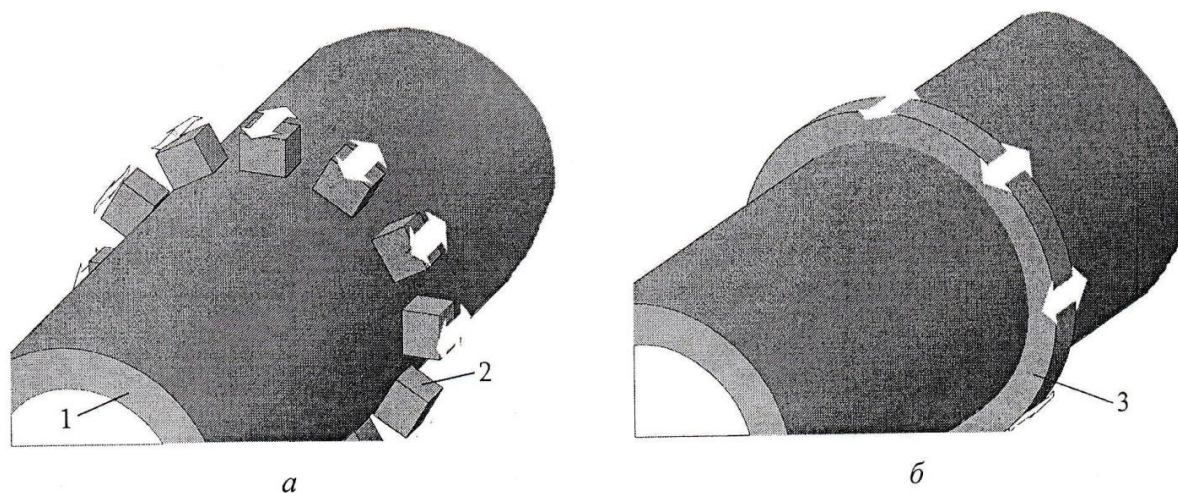


Рисунок 7 – Принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени (а) та напрямку руху (б) коливань поздовжньої моди спрямованої хвилі: 1 – труба; 2 – п'єзоперетворювач; 3 – кільцева акустична антена.

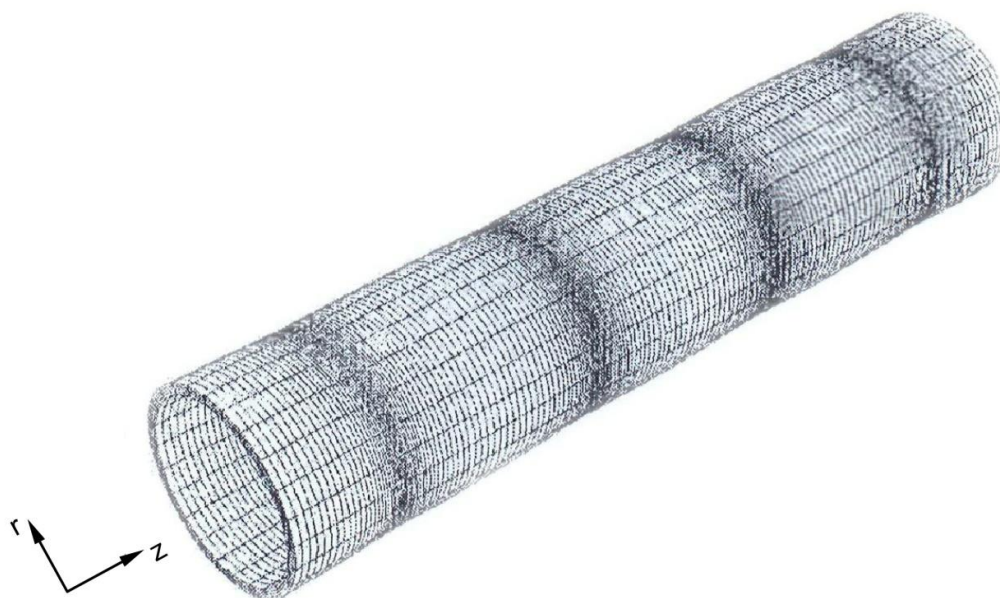


Рисунок 8 – Просторове уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби при розповсюдженні поздовжньої моди нульового порядку.

Поздовжня мода $L(0,2)$ нульового типу являє собою найпростішу поздовжню моду із синфазними поздовжніми зміщеннями частинок

труби в кожній точці її поперечного перерізу та малими поперечними зміщеннями.

На рис. 3. Наведено просторове уявлення про розподіл зміщення частинок середовища

труби при розповсюдженні поздовжньої моди нульового напрямку.

Для неруйнівного контролю протяжних трубопроводів низькочастотними ультразвуковими спрямованими хвилями найбільшу зацікавленість становить хвиля крутильної моди $T(0,1)$, тому що вона єдина крутильна мода, що може розповсюджуватись хвилеводом.

На рис.9 наведено принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени та напрямок

руху поперечних коливань для збудження крутильної моди спрямованої хвилі.

При такому принципі збудження п'єзоелементів акустичної антени частини середовища труби отримують зрушення за товщиною стінки в напрямку окружності труби та таким чином відбувається генерація крутильної моди спрямованої хвилі.

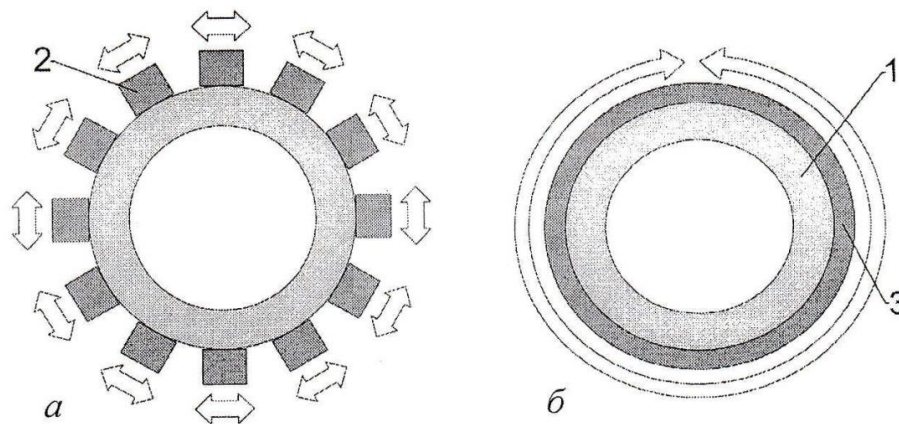


Рисунок 9 – Принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени (а) та напрямку руху (б) коливань крутильної моди спрямованої хвилі: 1 – труба; 2 – п'єзоперетворювач; 3 – кільцева акустична антена

Крутильні хвилі з модою $T(0,1)$ нульового порядку характеризуються рівністю фазової та групової швидкостей та не мають дисперсності. При розповсюдженні за поперечним перерізом труби спрямована хвиля низькочастотної моди $T(0,1)$ викликає лише єдину азимутальну компоненту зміщення частинок середовища труби відносно її поздовжньої осі, тобто являю собою поворот поперечного перерізу труби як цілого на деякий кут. Просторове уявлення про зміщення частинок середовища труба при розповсюдженні крутильної моди спрямованої хвилі наведено на рис. 5.

Хоча спрямовані хвилі крутильної моди розповсюджуються в трубі з меншою швидкістю, вони мають більш високу чутливість до неоднорідностей в порівнянні з поздовжньою хвилею. Відсутність дисперсії та мала швидкість крутильної хвилі дозволяють зменшити мертву зону та поліпшити роздільну здатність. Крутильна хвиля обов'язково проявляється від нульової частоти зі швидкістю поперечних хвиль, існує на будь-якій частоті при постійній швидкості поперечних хвиль та є віссиметричною модою.



Рисунок 10 – Просторове уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби при поширенні крутильної моди нульового порядку.

Наведені на рис. 3 та 5 просторові уявлення про розподіл частинок середовища при розповсюдженні поздовжньої та крутильної мод спрямованої хвилі показує, що вони мають рівномірне розподілення амплітуд коливань частинок середовища за поперечним перерізом труби.

Необхідно зауважити, що для збудження поздовжньої та крутильної мод спрямованої

хвилі використовуються одні й ті ж п'єзоперетворювачі простим поворотом їх на 90° .

На рис. 6 наведено принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени та напрямок руху згинальних коливань при збудженні згинальної моди спрямованої хвилі.

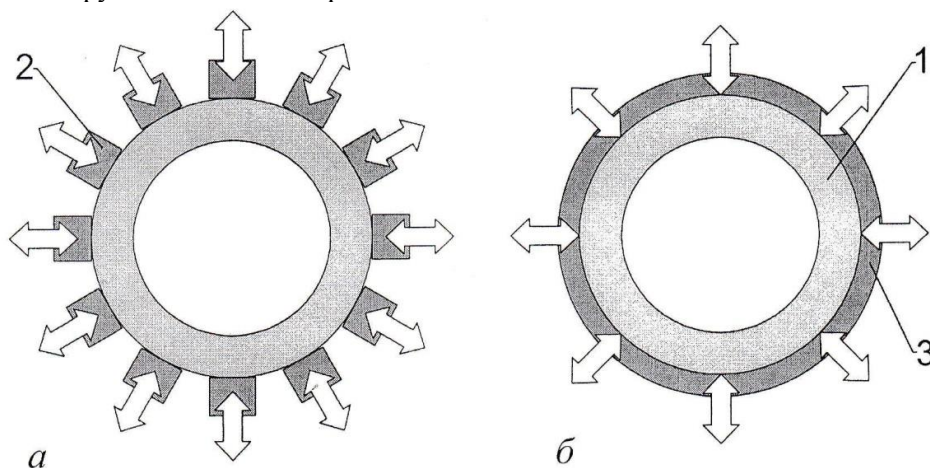


Рисунок 11 – Принцип збудження п'єзоелементів акустичної антени (а) та напрямок руху (б) коливань згинальної моди спрямованої хвилі: 1 – труба; 2 – п'єзоперетворювач; 3 – кільцева акустична антена

Згинальні моди $F(n,m)$ спрямованої хвилі, в залежності від параметра m мають різні за величиною амплітуди зміщення частинок середовища труби за поперечним перерізом в залежності від швидкостей розповсюдження цих хвиль в протяжному трубопроводі. Тому згинальна мода спрямованої хвилі характеризується складним розподіленням зміщення середовища труби (з вузлами та пучностями) за її поперечним перерізом та

сильною залежністю фазової та групової швидкостей від діаметру труби та величини поперечних зміщень частинок її середовища.

На рис. 7 наведено просторове уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби для двох спрямованих хвиль згинальної моди.

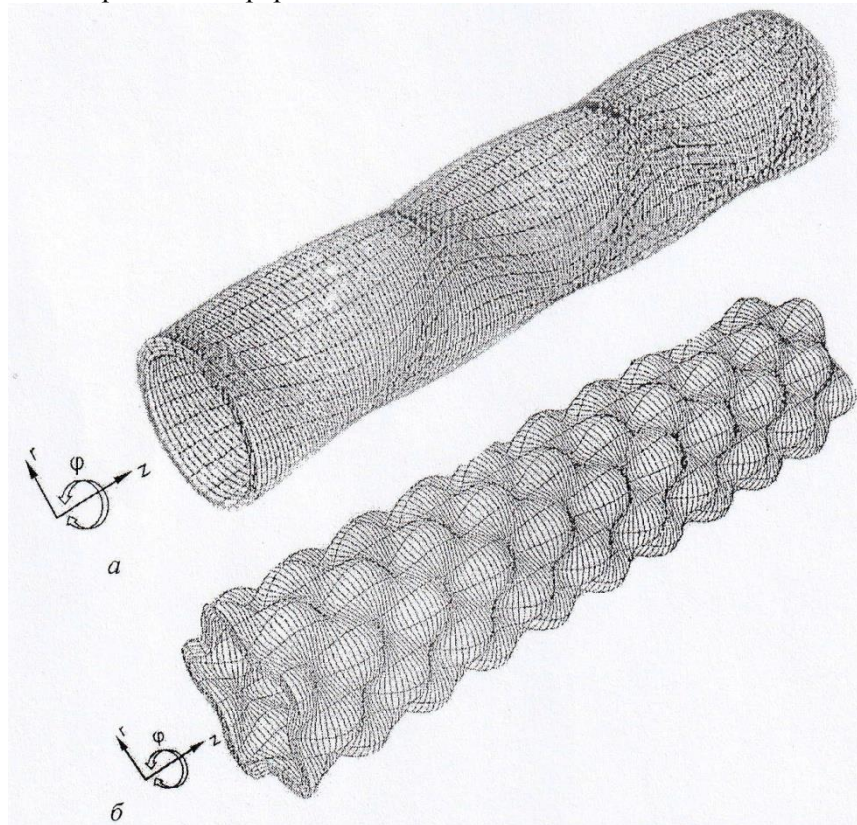


Рисунок 12 – Просторове уявлення про розподіл зміщення частинок середовища труби під час розповсюдження згинальної моди першого (а) та п'ятого (б) порядків спрямованої хвилі

Наведене просторове уявлення про розподілення частинок середовища труби при збудженні двох згинальних мод спрямованих хвиль в трубопроводі носять складний характер в залежності від значень параметрів n та m . В той же час із залежностей групових швидкостей різних мод спрямованих хвиль [1, рис. 4] видно, що існує група згинальних мод $[F(1,3), F(2,3), F(3,3)]$, групові швидкості яких в смузі високих частот більше 100 кГц напевно можуть

наближатись до швидкості поздовжньої моди $L(0,2)$, але не перевищувати її.

Розподіл зміщень частинок труби при наближенні групових швидкостей деяких згинальних мод спрямованої хвилі до швидкості поздовжньої моди $L(0,2)$ може свідчити про поздовжній тип коливань, а моди цих згинальних хвиль з максимальною груповою швидкістю можуть бути вісесиметричними. Але застосування згинальним мод спрямованих хвиль, які в своїй більшості є асиметричними,

потрібно обмежувати в неруйнівному контролі трубопроводів шляхом створення симетричних систем для збудження та приймання спрямованих хвиль, що розповсюджуються за поперечним перерізом труби.

Висновки.

1. Процес діагностування технічного стану протяжних трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями базується на принципі ультразвукової локації твердого середовища трубопроводу з однієї точки встановлення п'єзоперетворювачів акустичної антени.

2. При виборі частоти та моди спрямованої хвилі для діагностування технічного стану протяжних трубопроводів необхідно враховувати, що спрямована хвиля є результатом взаємодії вібрацій, створених перетворювачами, з поверхнею труби. Істотним фактором, що визначає ефективність передачі енергії від антени в тіло протяжного трубопроводу є узгодження внутрішніх опорів перетворювача та навантаження за рахунок статичної сили притискання п'єзоперетворювачів до поверхні труби.

3. При створенні систем низькочастотного ультразвукового діагностування протяжних трубопроводів спрямованими хвилями необхідно враховувати основні особливості хвильового процесу, який має складний механізм розповсюдження за товщиною стінки труби.

Література

1. Нисино Х. Теория и практика применения направленных волн для неразрушающего контроля //Hihakai Kensa. – 2003. – v. 52. - №12. – с. 654-661.

2. Hayasni T. Guided Wave Theory for Pipe Inspection and Prospective Technology // Hihakai Kensa. – 2004. – v. 54. - №12. – pp. 590-594.

3. Бергман А. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во иностр. Литературы, 1957. – 726 с.

4. Микер Т., Мейтцлер А. Волноводное распространение в протяжных цилиндрах и пластинах /Физическая акустика. Под ред. У. Мэзона. Т1. Ч. А. – М.: Мир, 1966. – с. 140-201.

5. Report. Long Range Ultrasonic testing technique – performance details /Document reference: TTP/01. May. 2001. - 20 p.

6. Kwun H., Crane J., Kim S., Parkin A., Light G. A Torsional Mode Guided Wave probe for Long Range, In bore Testing of Heat Exchanger Tubing //Materials Evaluation. – 2005. – v. 63. №4. – p. 430-433.

7. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав.ред. И.П. Голямина. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с.

8. Патон Б.Е., Лобанов Л.М., Недосека А.Я. и др. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре //Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. - № 3. –с. 7-14.

9. Годлевський В.С., Троїцький В.О., Бондаренко О.Г. Кореляційні методи й технології пошуку витоків у напірних трубопроводах //Зб. наук. пр. «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин». – Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України. – 2009. - 525-530.

10. Фирсов А.А., Терентьев Д.А. Алгоритм повышения точности локации при корреляционном течеискании, основанный на анализе функции фазы взаимного спектра //Контроль. Диагностика. – 2014. - № 3. – с. 23-27.

11. Патон Б.Е., Троїцький В.А., Бондаренко А.И. Метод низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов направленными волнами //Техн. диагност. и неразруш. контроль. – 2008. - №2. С. 20-30.

12. Furukawa T., Komuka J. Simulation of Guided Wave Propagation and Echo Prediction by Large – scale FEM // Hihakai Kensa. – 2012. – V. 61. - #2. Pp. 60-64

References

1. Nysyno Kh. Teoryia y praktyka pryumeneniya napravlennukh voln dlia nerazrushaiushcheho kontroliia //Hihakai Kensa. – 2003. – v. 52. - №12. – s. 654-661.

2. Hayasni T. Guided Wave Theory for Pipe Inspection and Prospective Technology // Hihakai Kensa. – 2004. – v. 54. - №12. – pp. 590-594.

3. Berhman A. Ultrazvuk y eho pryumenenye v nauke y tekhnike. – М.: Yzd-vo ynostr. Lyteratury, 1957. – 726 s.

4. Myker T., Meittsler A. Volnovodnoe rasprostraneniye v protiazhnukh tsylindrakh y

plastynakh /Fyzicheskaia akustyka. Pod red. U. Mezona. T1. Ch. A. – M.: Myr, 1966. – s. 140-201.

5. Report. Long Range Ultrasonic testing technique – performance details /Document reference: TTP/01. May. 2001. - 20 p

6. Kwun H., Crane J., Kim S., Parkin A., Light G. A Torsion Mode Guided Wave probe for Long Range, In bore Testing of Heat Exchanger Tubing //Materials Evaluation. – 2005. – v. 63. №4. – p. 430-433.

7. Ultrazvuk. Malenkaia entsyklopedyia. Hlav.red. Y.P. Holiamyna. – M.: Yzd-vo «Sovetskaia entsyklopedyia», 1979. – 400 s.

8. Paton B.E., Lobanov L.M., Nedoseka A.Ia. y dr. O pryimenenyy AE tekhnolohyy pry neprerivnom monytorynhe truboprovodov enerhetycheskykh kompleksov, robotaiushchykh pry vysokoi temperature //Tekhn. dyahnostyka y nerazrushaiushchy kontrol. – 2014. - № 3. –s. 7-14.

9. Hodlevskiy V.S., Troitskiy V.O., Bondarenko O.H. Koreliatsiini metody y tekhnolohii poshuku vytokiv u napirnykh truboprovodakh //Zb. nauk. pr. «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktsii, sporud i

mashyn». – Kyiv: IEZ im. Ye.O.Patona NAN Ukrainy. – 2009. - . 525-530.

10. Fyrsov A.A., Terentev D.A. Alhorytm povesheniya tochnosti lokatsyy pry korreliatsyonnom techeyskanyy, osnovannui na analyze funktsyy fazu vzaymnoho spektra //Kontrol. Dyahnostyka. – 2014. - № 3. – s. 23-27.

11. Paton B.E., Troytskiy V.A., Bondarenko A.Y. Metod nyzkochastotnoho ultrazvukovoho kontrolya protiazhennukh obektov napravlennumy volnamy //Tekhn. dyahnost. y nerazrush. kontrol. – 2008. - №2. S. 20-30.

12. Furukawa T., Komuka J. Simulation of Guided Wave Propagation and Echo Prediction by Large – scale FEM // Hihakai Kensa. – 2012. – V. 61. - #2. Pp. 60-64