

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.691.4

DOI 10.31471/1993-9981-2022-1(48)-5-17

### МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПРОТЯЖНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*О. Г. Бондаренко*

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

Показано, що серед великої кількості трубопровідних систем (трубопроводів) в різних галузях вітчизняної промисловості одними з найпоширеніших є технологічні трубопроводи, виготовлені з труб середнього діаметру з умовними проходками від 50 до 300 мм. Вони призначені для транспортування рідких, газоподібних і сипучих речовин (продуктів) за різних тисків і температур. Наведена спрощена класифікація технологічних трубопроводів із труб середнього діаметру, які широко застосовуються у нафтовій, газовій, хімічній, металургійній, енергетичній та інших важливих галузях вітчизняної промисловості. Виконано аналіз методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів, які розділено на дві групи – пасивні та активні.

Наведено спрощені класифікації пасивного й активного методів неруйнівного контролю, які за розміром контрольованої зони розділені на локальні та регіональні. Виконано аналіз застосування пасивних методів неруйнівного контролю для виявлення зон концентрації напружень, а активних – для виявлення дефектів корозії, потоншення стінки труби та стрес корозійного розтріскування технологічних трубопроводів. Показано, що серед активних методів неруйнівного контролю протяжних технологічних трубопроводів найбільше поширення отримав метод низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. Розроблена класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі в структурі протяжного технологічного трубопроводу.

**Ключові слова:** технологічний трубопровід, методи неруйнівного контролю, пасивні та активні, відбивачі.

It is shown that among the large number of pipeline systems (pipelines) in various branches of domestic industry the technological pipelines made of medium diameter pipes with conditional passages from 50 to 300 mm are one of the most common. They are designed to transport liquid, gaseous and bulk substances (products) at different pressures and temperatures. A simplified classification of technological pipelines from medium diameter pipes, which are widely used in oil, gas, chemical, metallurgical, energy and other important branches of domestic industry, is given. Analyzed non-destructive testing methods of technological pipelines divided into two groups - passive and active.

Simplified classifications of passive and active NDT methods are given, which are divided into local and regional according to the size of the controlled zone. The analysis of application of passive methods of non-destructive testing for detection of stresses concentration zones, and active - for detection of defects of corrosion, thinning of a wall of a pipe and stress of corrosion cracking of technological pipelines is executed. It is shown that among the active methods of non-destructive testing of long technological pipelines the method of low-frequency ultrasound with directional waves has become the most widespread. The classification of typical reflectors of low-frequency directional wave in the structure of a long technological pipeline is developed.

**Key words:** technological pipeline, methods of non-destructive testing, passive and active, reflectors.

**Вступ.** Трубопровідні системи (трубопроводи) є одним із найпоширеніших видів зварних конструкцій і знаходять широке застосування в різних галузях народного господарства України. Через різну

пропускну здатність розміри (діаметри) трубопроводів коливаються у великому діапазоні.

Для скорочення кількості розмірів труб, арматури та з'єднувальних елементів, забезпечення прохідних перерізів трубопроводів введено поняття

умовного проходу, під яким розуміють розрахунковий округлений діаметр трубопроводу. В різних галузях народного господарства при створенні трубопроводів застосовуються труби з умовними проходами від 6 до 2000 мм. Серед великого різноманіття протяжних трубопровідних систем одним із найпоширеніших є зварні технологічні трубопроводи із труб середнього діаметру з умовними проходами від 50 до 300 мм. Вони призначені для транспортування рідких, газоподібних і сипучих речовин (продуктів) при різних тисках та температурах. Такі трубопроводи виготовляються із металу, склопластику, пластмас та інших матеріалів, які все частіше застосовуються замість металу. Але найбільш проблемними ще тривалий час будуть залишатися металеві технологічні трубопроводи.

**Класифікація протяжних технологічних трубопроводів середнього діаметра.** Технологічні трубопроводи із труб середнього діаметра складають значну частину обладнання промислових установок підприємств нафтової, газової, хімічної, металургійної, енергетичної та інших важливих галузей народного господарства. Вони є одними із найбільш відповідальних та металомісткісних споруд любого промислового об'єкту, що здійснюють зв'язок між машинами, апаратами та виробництвами й забезпечують неперервність технологічних процесів.

На рис. 1 приведена спрощена класифікація протяжних трубопроводів із труб середнього діаметра, що застосовуються в різних галузях вітчизняної промисловості

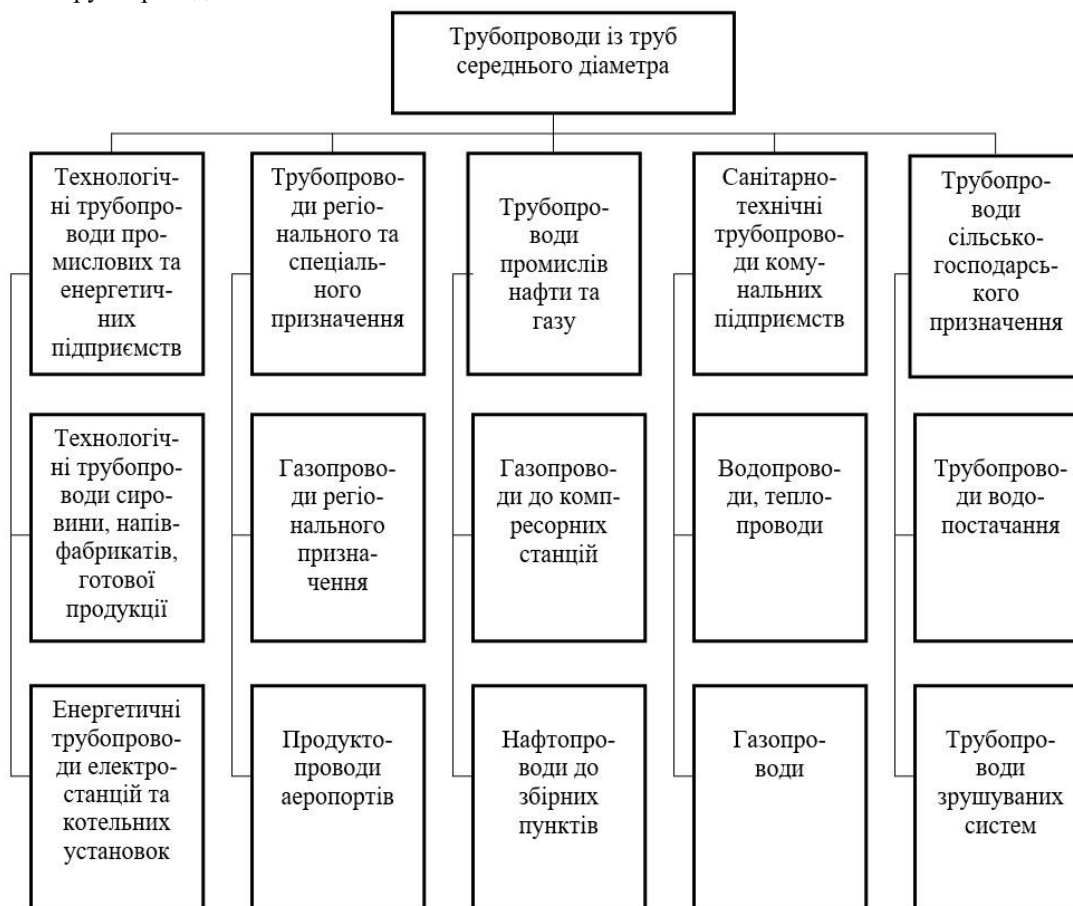


Рисунок 1 – Спрощена класифікація технологічних трубопроводів із труб середнього діаметра

У залежності від галузі народного господарства протяжні трубопроводи із труб середнього діаметра розділені нами на: технологічні трубопроводи промислових та енергетичних підприємств; трубопроводи регіонального та спеціального призначення;

трубопроводи промислів нафти та газу; санітарно-технічні трубопроводи комунальних підприємств; трубопроводи сільськогосподарського призначення.

До більшості технологічних трубопроводів різного призначення пред'являються підвищені

вимоги, які пов'язані з додержанням визначених правил при їх проектуванні, виготовленні та монтажі. Це пов'язано з тим, що від якості трубопроводів, їх міцності та працездатності залежить надійність та довговічність різних промислових об'єктів, будинків і споруд. Ці вимоги в рівній мірі відносяться як до технологічних трубопроводів виробничих підприємств, де аварія трубопроводу може призвести до втрат продуктів транспортування, вибухам і катастрофам, так і до трубопроводів водо-, тепло- і газопостачання комунального господарства, коли аварії в цих трубопроводах також призводять до важких наслідків. Особливо це стосується експлуатації фізично застарілих трубопроводів з величезними запасами потенційної енергії вибухонебезпечних і отрутних продуктів, тому що ймовірність і небезпека аварійних ситуацій у цих випадках транспортування призводить до локальних і загальних забруднень навколишнього середовища, величезним матеріальним втратам і створює підвищений ризик з погляду персоналу й населення.

На даний час в Україні спостерігається суттєве зношування значної кількості технологічних трубопроводів, що практично стає проблемою гарантування їх надійності та роботопридатності. В цих умовах задача контролю та діагностування технічного стану технологічних трубопроводів переростає в одну із головних виробничих проблем. Велика кількість різноманітних технологічних трубопроводів, старіння, різноманітність умов експлуатації, велика небезпека аварійних відмов обумовлюють необхідність розвитку та розширення сфер застосування фізичних методів та засобів неруйнівного контролю як якості труб, так і методів та засобів діагностування технічного стану трубопроводів шляхом визначення параметрів дефектів несущільностей у тілі труб на основі даних, отриманих в процесі виконання процедури неруйнівного контролю (НК).

**Методи неруйнівного контролю технологічних трубопроводів.** Однією з головних причин всіх аварій та технологічних трубопроводах різного призначення є несвоєчасне забезпечення відповідних служб підприємств необхідними сучасними засобами та методиками для проведення процедур

неруйнівного контролю з метою отримання хоча б якоїсь оцінки поточного технічного стану трубопроводів.

Відомо, що протягом довгого часу існує стандартизована класифікація методів неруйнівного контролю, яка враховує декілька кваліфікованих критеріїв. Така класифікація методів НК носить формальний характер і швидше всього розділяє весь багатовид методів та засобів НК за способом виділення ефекту ніж з типом фізичного поля. На даний час у науково-технічній літературі розповсюджені усталені класифікації для окремих видів контролю, наприклад, акустичного неруйнівного контролю [1, 2]. Згідно з цими класифікаціями акустичні методи НК розділено на дві великі групи – пасивні та активні.

Пасивні методи ґрунтуються на прийманні акустичного сигналу чи коливання, джерелом яких служить сам об'єкт, а активні – на випромінюванні та прийманні акустичного сигналу чи коливання.

При проведенні процедур неруйнівного контролю та діагностування технічного стану протяжних технологічних трубопроводів важливим є виявлення дефектів та визначення їх розмірів для оцінки остаточного ресурсу трубопроводів. Але не менш важливим є виявлення локальних зон пошкоджень, що розвиваються, тобто зон концентрації напружень (ЗКН), виявлення найбільш небезпечних ЗКН, визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) у найбільш небезпечних ЗКН, а також визначення фактичних структурно-механічних характеристик матеріалу в ЗКН та оцінка швидкості і напрямку розвитку пошкоджень у експлуатуємому трубопроводі.

Звідси випливає, що основним призначенням неруйнівних методів контролю є отримання інформації в об'ємі, необхідній та достатній для діагностування технічного стану трубопроводу й виконання розрахунків його залишкового ресурсу. При цьому бажано було б забезпечити стовідсотковий контроль та діагностування трубопроводу з метою гарантованого виявлення найбільш небезпечних ЗКН та пошкоджень, що розвиваються.

Для цього необхідно використовувати різноманітні методи НК, які базуються на різних фізичних полях. Тому класифікувати ці методи

треба за типом фізичного поля, який можна віднести до наведених вище двох груп [3]:

- пасивні – які використовують власні фізичні поля, що відображують внутрішню енергію матеріалу трубопроводу;
- активні – з створення в матеріалі труби «примусового» фізичного поля заданої орієнтації.

Класифікація методів НК як пасивних та активних створює передумови для об'єктивної класифікації виявляємих дефектів на небезпечний, що розвивається, та на безпечний, що не розвивається.

На рис. 2 наведена спрощена класифікація пасивних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів.

Призначенням пасивних методів НК є проведення раннього діагностування технологічних трубопроводів шляхом виявлення ЗКН як основних джерел пошкоджень, що розвиваються у трубопроводі.

За величиною контрольованої зони пасивні методи контролю розділено на локальні та регіональні. До локальних методів неруйнівного контролю за видами, що використовують вимірювання власних фізичних полів матеріалу трубопроводу, можна віднести магнітні та теплові методи. Серед пасивних магнітних видів контролю на даний час найбільше розповсюдження отримали метод магнітної пам'яті металу (МПМ) та метод магнітопружного ефекту (МПЕ). Серед теплового виду контролю все більше розповсюдження отримує тепловізійний метод контролю. За допомогою наведених пасивних методів контролю можна контролювати зону трубопроводу, яка знаходиться під давачем технічного засобу. Локальні пасивні методи контролю використовуються для виявлення зон концентрації напружень (ЗКН) у протяжних технологічних трубопроводах.



Рисунок 2 – Спрощена класифікація пасивних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів

Серед акустичного виду контролю найбільше розповсюдження отримали метод акустичної емісії (АЕ) та кореляційний метод, які віднесені до регіональних за величиною контрольованої зони. За допомогою цих методів можна фіксувати інформацію про технічний

стан трубопроводу на значній його ділянці за довжиною.

Метод МПМ отримав значне поширення для визначення напружено-деформованого стану (НДС) на окремих ділянках технологічного трубопроводу, що приводить до появи ЗКН та розвитку ушкоджень у металі стінки труби.

Перебуваючи в експлуатації протягом досить тривалого часу, піддаючись температурним і механічним впливам, обумовленим коливанням земної кори, труби в магнітному полі землі намагнічуються. Це значить, що труба буде мати своє власне постійне магнітне поле, що замикається усередині тіла труби. Якщо в перетині труби має місце порушення несучильності (дефект, корозійне ураження), що приводить до зміни намагніченості, то в цих місцях труби магнітне поле спотворюється, виникають магнітні полюси, утворюється магнітне поле розсіювання, тобто виникає, так звана, магнітна аномалія [4]. Магнітне поле розсіювання від дефекту тим більше, чим більше дефект і чим він ближче до поверхні, над якою проводиться вимір. При цьому маленькі тріщини створюють різкі й вузько локалізовані градієнти поля. Дефекти типу корозійних уражень, що представляють більші ушкодження поверхні й положень країв, не створюють різких градієнтів поля.

При діагностуванні любых об'єктів з використанням МПМ основною ознакою (якісним критерієм) зон концентрації напружень є наявність в контрольованій зоні ліній, які характеризуються зміною знаку нормальної складової магнітного поля розсіювання. Для кількісної оцінки рівня концентрації напружень визначається градієнт (інтенсивність зміни) нормальної складової поля. В якості зразка (еталона) для порівняння в методі МПМ використовується магнітограма, яка вимірюється у зонах із задовільним станом методу, тобто поза зоною ЗКН. На основі порівняння магнітограм в ЗКН і поза нею робиться оцінка НДС технологічного трубопроводу.

В останні роки велику зацікавленість проявляють до пасивного методу контролю напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, який ґрунтується на кореляції магнітних та механічних параметрів металів [5]. У технологічних трубопроводах напружено-деформований стан частіше всього виникає в місцях згину труби внаслідок перевантажень, що пов'язані з приростом стискальних та розтягуючих напруг на діаметрально протилежних сторонах труби. В цьому випадку можна очікувати, що при згині труби, в умовах

неоднорідності напруженого стану, порівняльна оцінка магнітних властивостей труби по її периметру може виявитися достатньо інформативною. Це пов'язано з тим, що оскільки кругове направлення у розподіленні напруг співпадає з профілем труби, то за картиною зміни магнітних властивостей можна вказати величину та напрямок силового діяння по периметру труби.

Отримання даних про напружений стан труби на окремих ділянках технологічного трубопроводу є достатньо важливою складовою частини їх діагностики. Цу дозволить вказати шляхи усунення перевантажень та проконтролювати їх зміну внаслідок проведення відновлювальних робіт.

Для контролю НТС труб в місцях їх згину запропоновано використовувати пасивний механічний метод, в основі якого лежить магнітопружний ефект (МПЕ) – фізичне явище, що базується на зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією механічних сил [6, 7]. Технологічні трубопроводи можуть випробовувати непроекtnі згинні навантаження, які пов'язані з опуклістю або осіданням опор, що характерно для місць з нестійкими ґрунтами, а також зазнавати дії навантажень, що виникають внаслідок помилок монтажу при будівництві. В цьому випадку з'явлення напружень згину може бути виявлено при контролі основних напруг, на основі яких в залежності від їх рівня оцінюють міцність та стійкість трубопроводів у повздовжньому напрямку. Високі повздовжні напруги небезпечні головним чином для ділянок з дефектами зварювання стиків, оскільки наявність дефектів знижують несучу можливість трубопроводу у основному напрямку та можуть привести до його руйнування.

Даний метод магнітопружного ефекту є одним із способів усунення згину та повернення трубопроводів у початковий розвантажувальний стан. Він може служити способом регулювання опорних елементів для досягнення симетричної однорідної картини напруженого стану труби в контролюємому перерізі. В результаті проведення дослідно-промислового випробування способу зниження напруг при виконанні ремонтних робіт на трубопроводах вдалося за картиною неоднорідного

розподілення магнітних властивостей, що мали місце ознак перевантажень, шляхом регулювання опор добитись положення трубопроводів із симетрією магнітних властивостей труб, з мінімальним вигином та низьким рівнем напруг [7].

Відомо, що виникнення в об'єкті контролю НДС може супроводжуватися зміною температури у зоні концентрації напружень, в результаті чого відбувається теплове випромінювання, яке формує температурне поле. Це поле несе інформацію про внутрішню структуру об'єкта, яке може бути проконтрольоване за допомогою пасивного виду теплового неруйнівного контролю з застосуванням тепловізійного методу [8]. Цей метод можна успішно використовувати для виявлення НДС технологічних трубопроводів.

Серед пасивних регіональних методів НК технологічних трубопроводів найбільше розповсюдження отримали методи акустичної емісії (АЕ) і кореляційний метод.

У пасивному методі акустичної емісії (АЕ) реєструють параметри пружних коливань, що виникають в об'єкті контролю під час його функціонування або під впливом стимулюючих (сторонніх) дій. Цей метод базується на аналізі параметрів біжучих пружних хвиль акустичної емісії, які випромінюються самим матеріалом внаслідок внутрішньої динамічної локальної перебудови його структури. Така перебудова викликана рухом груп дислокацій, зародженням і розвитком тріщин, алотропічними перетвореннями в кристалічній ґратці. Відслідковуючи такі параметри, як кількість імпульсів за одиницю часу, частоту випромінювання, амплітудний і спектральний розподіл, діаграму розсіювання тощо, отримають інформацію про стан матеріалу трубопроводу, зміни в ньому, виникнення та розвиток дефектів типу тріщин і т.п. Особливості застосування методу акустичної емісії можна знайти у науково-технічній літературі [9 – 11].

Для визначення місць пошкоджень стінки труби, які визиваються корозією і ерозійним зношенням стінки, а особливо для пошуку витоків продуктів із протяжних трубопроводів в різних країнах світу одержав поширення пасивний кореляційний метод [12]. Особливо це стосується протяжних технологічних

трубопроводів систем газо-, нафто-, тепло-, водопостачання, а також трубопроводів на недоступних ділянках їхньої прокладки типу переходів під дорогами, залізничними коліями й ін. На таких ділянках трубопроводи прокладаються в захисні труби – гільзи, тому відсутня можливість доступу або істотно утруднений доступ до діагностуємої труби.

Сутність методу полягає в тому, що з обох боків ділянки трубопроводу, що діагностується, встановлені два датчики для перетворення в електричний сигнал гідравлічних хвиль, які створює середовище, що витікає під тиском з отвору в стінці труби. Сигнали від датчиків передаються з вхідних електронних блоків в обчислювальний блок, що визначає різницю часу приходу хвиль від витоків до датчиків, яка знаходиться обчисленням й обробкою кореляційної функції. Часова затримка між сигналами, що відповідає максимуму кореляційної функції, характеризує місце розташування витоків. Аналогічним чином визначаються дефекти стоншення стінки труби, що визиваються корозією та ерозійним зношенням.

Призначенням активних методів є виявлення дефектів корозії, стрес-корозійного розтріскування й уточнень стінки труби (втрат металу в перетині труби), які можуть виникати за рахунок корозії або ерозійного зношення, а також місць розташування дефектів по довжині технологічного трубопроводу.

За величиною контрольованої зони активні методи неруйнівного контролю також можна розділити на локальні та регіональні. До локальних методів неруйнівного контролю за видами, що створюють в матеріалі труби «примусове» фізичне поле заданої орієнтації, можна віднести акустичні, магнітні та рентгенографічні. Серед активних локальних методів для визначення дефектів найчастіше використовуються ультразвукова та магнітна товщинометрія. Ці методи дозволяють за допомогою давачів технічного засобу вимірювати втрати металу труби в місті дефекту у локальних зонах.

Серед регіональних активних методів найбільш поширеним є акустичний вид контролю, до якого на даний час можна віднести кореляційний метод та метод низькочастотного ультразвукового контролю

спрямованими хвилями. Ці методи дозволяють виявляти наявність дефектів стінки труби на значній відстані від установки датчиків.

На рис. 3 наведена спрощена класифікація активних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів.

Локальні ультразвуковий та магнітний методи контролю дозволяють проводити обстеження технічного стану технологічних трубопроводів при односторонньому доступі до їх поверхні.

За допомогою цих методів із застосуванням ультразвукової та магнітної товщинометрії вимірюється зменшення стінки труби, що виникає в процесі експлуатації трубопроводів різного призначення. Контроль таких трубопроводів може виконуватися під час планових ремонтів та засвідчувати про кородування внутрішньої поверхні труб та погіршення їх міцнісних характеристик.



Рисунок 3 – Спрощена класифікація активних методів неруйнівного контролю технологічних трубопроводів

В роботі [13] розглянуто засоби та розроблені методики контролю технологічних трубопроводів засобами ультразвукової товщинометрії, які дозволяють виявляти корозійні ураження на внутрішній поверхні труби, характер та стадії корозії, визначати ступінь виразковості та глибину окремих

виразкових уражень. Для досліджень було підготовлено набір зразків труб із різною глибиною та характером корозійного ураження поверхні. Для досліджень використовувалися зразки труб, вирізані із ділянок трубопроводів зовнішнім діаметром 102 мм, що знаходилися в

експлуатації. Внутрішня поверхня зразків відрізнялась ступенем та характером корозії.

Треба відмітити, що виникнення корозійних уражень, як виразкової корозії, є випадковою функцією як параметрів металу (структури, текстури, товщини тощо), так і параметрів агресивного середовища (хімічного складу, температури, тиску, швидкості потоку, часу дії тощо). Всі ці параметри діють незалежно й, додаючись, формують закон розподілення корозійних уражень трубопроводів.

Враховуючи, що на виробництві під час зупинки трубопроводів необхідно проводити 100%-ний контроль поверхні труби, то при дослідженні металу зразків труб ультразвуковими товщино мірами треба проводити вимірювання через 10 – 20 мм. Загальна кількість вимірювань на кільці труби шириною 150 – 180 мм складала менше 30 – 40 точок. Тому провести неруйнівний контроль протяжних технологічних трубопроводів засобами ультразвукової та магнітної дефектоскопії за час виведення із експлуатації практично неможливо.

Тому на даний час почали інтенсивно розвиватися активні регіональні методи неруйнівного контролю протяжних трубопроводів із труб середнього діаметра. До таких методів можна віднести:

- кореляційний метод визначення показника усередненого утонення стінок трубопроводів шляхом генерування шумоподібних поперечних гідравлічних хвиль типу гідроудару антеною-передавачем і прийому відбитих від дефектів луно-сигналів двома датчиками, установленими на кінцях діагностуємої ділянки;

- метод низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями шляхом генерування поздовжніх або крутильних хвиль із однієї точки установки перетворювачів акустичної антени на діагностуємій ділянці трубопроводу й прийому відбитих від дефектів луно-сигналів тими ж перетворювачами.

За допомогою регіональних методів контролю здійснюється виявлення місць розміщення корозійних уражень та ерозійного зносу стінок труби на окремих ділянках протяжних трубопроводів. Для уточнення розмірів та глибини цих уражень стінки труби застосовуються локальні методи ультразвукової та магнітної товщинометрії, тощо.

Кореляційний активний метод контролю параметрів стоншення стінки труби та координат витоків продуктів із трубопроводу відрізняється від пасивного тим, що швидкість поширення гідравлічних хвиль для кожного конкретного

трубопроводу визначається експериментальним шляхом. Для цього система контролю у своєму складі має додатковий синтезатор зондувальних сигналів і нову модифіковану програму обробки сигналів [12].

Активний кореляційний метод не тільки дає можливість проводити визначення реальних значень швидкості поширення гідравлічних хвиль у трубопроводі, який діагностується, для забезпечення необхідної точності визначення місць витоків продуктів із трубопроводу, але й відкриває додаткові можливості порівняння з пасивним методом контролю. Так, активний кореляційний метод дозволяє визначати усереднене потоншення стінки труби на діагностуємій ділянці трубопроводу, визване її корозією або ерозійним зношенням, що дозволяє проводити оцінку загального технічного стану протяжного трубопроводу.

Істотним прогресом у розвитку регіональних активних методів контролю технічного стану протяжних трубопроводів стала розробка технології й систем дистанційної дефектоскопії протяжних трубопроводів з використанням методу далекодіючого низькочастотного ультразвукового контролю (НЧ УЗК) спрямованими хвилями. Найбільший розвиток така технологія контролю трубопроводів різного призначення одержала в середині 1990 років в Англії [14], США [15], а потім у Японії [16]. Аналіз основних характеристик та особливостей низькочастотного ультразвукового хвильового процесу в тілі середовища протяжного трубопроводу при контролі його технічного стану наведені в роботі [17].

Значною перевагою цього методу перед традиційними методами УЗК є те, що він може бути використаний як при експрес-контролі технічного стану трубопроводів різного призначення після їхнього монтажу шляхом формування первісної дефектограми трубопроводу, так і при здійсненні поточних процедур контролю в процесі їх експлуатації.

Сучасні системи низькочастотного УЗК у своїй більшості оснащені відповідним програмним забезпеченням, що дозволяє на основі отриманих даних контролю проводити процедуру діагностування технічного стану протяжних трубопроводів. Узагалі процес визначення технічного стану любих промислових об'єктів характеризується комплексністю підходів, яка полягає у використанні різних науково-технічних дисциплін технічної діагностики, методів і засобів неруйнівного контролю та технічного



діагностування й носить назву контрольно-діагностичного процесу [12]. В основі контрольно-діагностичних процесів лежать відповідні контрольно-діагностичні технології, за допомогою яких забезпечується мінімізація методів і засобів неруйнівного контролю та технічного діагностування і достовірність визначення технічного стану промислового об'єкта на всіх етапах його функціонування з видачею науково-обґрунтованого прогнозу щодо тривалості та ресурсу його експлуатації

Структура контрольно-діагностичного процесу залежить від виду промислового об'єкта. Тому можна вважати, що об'єкт, методи і засоби, що застосовуються для визначення його технічного стану, в своїй сукупності утворюють систему визначення технічного стану любого промислового об'єкта. Розробка структури контрольно-діагностичного процесу на основі системи низькочастотного УЗК протяжних трубопроводів надає можливість створення інформаційної бази про їх технічний стан та розрахунку експлуатаційного ресурсу трубопроводів.

Багато проблем неруйнівного контролю та технічного діагностування різноманітних технологічних трубопроводів можуть бути вирішені шляхом застосування систем низькочастотного УЗК спрямованими хвилями. На відміну від протяжних магістральних трубопроводів технологічні трубопроводи складаються із значної кількості різноманітних щільно з'єднаних між собою структурних трубопровідних елементів: відрізків труб необхідної довжини та різних видів трубних відводів від них, з'єднаних за допомогою зварювання, запірно-регулюючої арматури, контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматизації, опор і ущільнених, інших різноманітних конструктивних елементів, необхідних для забезпечення роботоздатності технологічного трубопроводу.

Саме структурні трубопровідні елементи, зварні з'єднання, а також так звані експлуатаційні несучільності, що виникають у металі труб – корозійні ураження зварних з'єднань, стінки труби та її ерозійний знос, є потенційними відбивачами низькочастотних спрямованих хвиль в процесі проведення процедур неруйнівного контролю та технічного діагностування стану трубопроводів різного призначення. Тому першим етапом з розробки

контрольно-діагностичного процесу технологічних трубопроводів можна вважати класифікацію типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічного трубопроводу.

#### **Класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічного трубопроводу.**

На основі аналізу структур технологічних трубопроводів розроблена класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі, яка наведена на рис. 4. Усі відбивачі технологічного трубопроводу розділено на три типи: технологічні, конструктивні та експлуатаційні. Така кваліфікація обумовлена перш за все тими особливостями низькочастотного хвильового руху в середовищі стінки труби, коли в ній збуджуються й розповсюджуються вісьосиметричні (поздовжня та крутильна) низькочастотні спрямовані хвилі. Але в залежності від типу відбивачів відбита від них низькочастотна хвиля може бути або симетричною або асиметричною. Тому в подальшому в класифікації типові відбивачі розбиваються на два типи: симетричні та асиметричні, або тільки асиметричні, якими є експлуатаційні відбивачі.

До технологічного типу симетричних відбивачів відносяться зварні з'єднання трубопроводу, які формуються по усьому діаметру труби та товщині стінки труби в процесі стикування між собою труб і патрубків, а також стикування з трубою відводів трубопроводу, переходів, фланців, заглушок, компенсаторів. Зварні з'єднання таких елементів у структурі трубопроводу проводять до симетричного збільшення товщини стінки труби, тобто мають необхідну добавку, яка симетрично змінює геометричну форму поперечного перерізу труби. В той же час при приєднанні до тіла труби трійників за допомогою процесу зварювання їх зварні з'єднання віднесені до асиметричних відбивачів у зв'язку з стикуванням до тіла труби тільки на частині труби по її діаметру, що приводить до асиметричної зміни її поперечного перерізу. До конструктивного типу симетричних відбивачів відносяться фланці, відводи, заглушки та компенсатори, які стикуються з трубою по усьому її поперечному перерізу. Різного роду опори та підвіски труб віднесені до асиметричних конструктивних елементів трубопроводів.

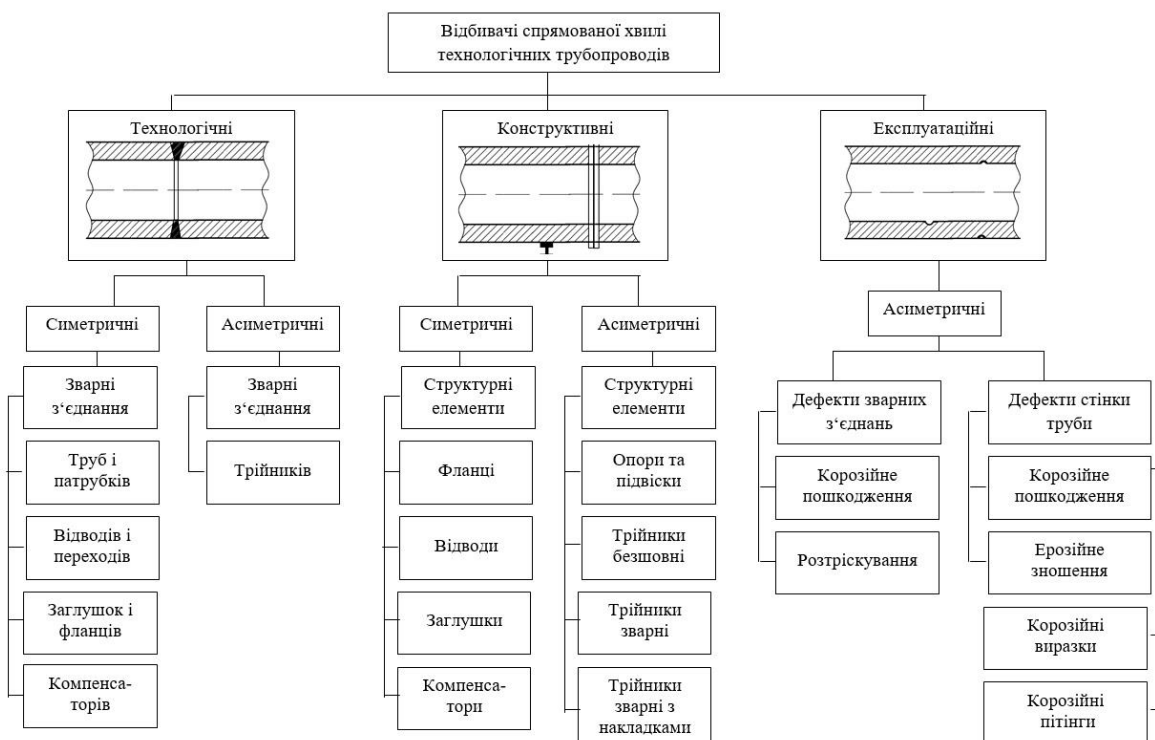


Рисунок 4 – Класифікація типових відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі у структурі технологічних трубопроводів

Вони приводять до збільшення товщини стінки труби в окремих місцях, тобто в місцях кріплення труби. До асиметричних конструктивних відбивачів відносяться також безшовні та зварні трійники, які зменшують поперечний переріз труби, та зварні трійники з накладками. Останні є добавками до стінки труби і тому зменшують її товщину та зменшують геометричну форму поперечного перерізу труби.

Місце розміщення конструктивних елементів у структурі протяжного трубопроводу відомі згідно з технічною документацією на трубопровід, тому відбиті луно-сигнали від технологічних та конструктивних відбивачів будуть створювати цілу систему таких сигналів збуджуваної в трубопроводі низькочастотної спрямованої хвилі. Відбиті сигнали від цих відбивачів є важливими мітками для визначення місця розташування експлуатаційних відбивачів, які відносяться до асиметричного виду відбивачів.

Досвід тривалої експлуатації та технічного діагностування технологічних трубопроводів

засвідчують, що в таких трубопроводах зростає кількість експлуатаційних пошкоджень зварних з'єднань та стінки труби, які в основному мають корозійно-механічну природу і утворюються, в першу чергу, в місцях підвищеної концентрації напружень.

Аналіз експлуатаційних пошкоджень трубопроводів різного призначення показує, що основними характерними особливостями процесів їх розвитку є певна локалізація. Тому такі пошкодження, що виникають в трубопроводі, розділені нами на дефекти зварних з'єднань та дефекти стінки труби.

Дефекти зварних з'єднань можуть бути спричинені технологією виготовлення протяжного трубопроводу. Але найбільше дефектів зварних з'єднань, до яких відносяться корозійне пошкодження та розтріскування у зварному шві, виникають під час експлуатації трубопроводів. В процесі діагностування трубопроводів низькочастотними спрямованими хвилями вони будуть ідентифікуватися синхронно зі зварними швами.

Локалізація пошкоджень стінки труби залежить від особливостей стану металевої

поверхні труби, що спричинена існуванням на поверхні металу певних неоднорідностей чи включень, які приводять до утворення локальних корозійно-ерозійних втрат металу в стінці труби.

Такі ділянки експлуатаційних пошкоджень стінки труби відносяться до асиметричних відбивачів трубопроводу й будуть розташовуватися в різних місцях по траєкторії розповсюдження низькочастотної спрямованої хвилі по трубопроводу. Найбільш характерними ерозійними пошкодженнями стінки труби можуть бути корозійні виразки, пітинги тощо, що виникають в результаті довготривалої експлуатації технологічних трубопроводів, особливо в агресивних умовах. Із цих корозійних пошкоджень особливо небезпечними є пітинги, які можуть пронизувати всю товщину стінки труби. Корозійні пошкодження стінки труби є експлуатаційними концентраторами напружень, що можуть привести до руйнування трубопроводів.

Корозійні пошкодження стінки труби орієнтовані як уздовж окружності труби, так і уздовж поздовжньої вісі труби. Вони можуть перебувати на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труби, однак розпізнати, яка саме ця поверхня за допомогою низькочастотної спрямованої хвилі неможливо. Пошкодження стінки труби, обумовлені ерозійним зношенням, найчастіше орієнтовані уздовж поздовжньої вісі труби й розташовані з боку внутрішньої поверхні.

Для ідентифікації місця розміщення асиметричних експлуатаційних відбивачів у протяжному трубопроводі за відбитими луно-сигналами спрямованої хвилі служать луно-сигнали від технологічних та конструктивних відбивачів.

Крім розглянутих відбивачів низькочастотних ультразвукових спрямованих хвиль, у протяжних трубопроводах внаслідок тривалої експлуатації можуть проявлятися дефекти, зумовлені відхиленнями від вимог технології та стандартів під час заводського виробництва труб [18]. Це призводить до появи на їх поверхнях різноманітних подряпин, задирок та рисок, які надалі відіграють роль ефективних концентраторів напружень, закладених на етапі виготовлення труб. Якщо ці концентратори знаходяться в зоні термічного впливу зварного з'єднання, або біля неї, то в

подальшому вони можуть слугувати джерелом зародження та поширення в трубі тріщин, зумовлених корозійним розтріскуванням.

Якщо амплітуди відбитих сигналів спрямованої хвилі від подряпин, задирок та рисок будуть знаходитися на рівні завад, то дефекти корозійного розтріскування стінки труби (особливо поперечні) будуть виявлятися спрямованими хвилями. Окрім цього, після неякісного зварювання в зварних з'єднаннях труб можлива поява підрізів, непроварів та шлакових включень, які також є потенційними концентраторами напружень, біля яких можуть зароджуватись тріщино подібні дефекти.

Однак основними в протяжних трубопроводах слід вважати дефекти корозійної та корозійно-механічної природи, які становлять більше половини всіх пошкоджень стінки труби. Вони, в першу чергу, пов'язані із втратою з часом експлуатаційних властивостей захисних покриттів, що приводить до виникнення умов, які активізують корозію металу труб. У результаті цих процесів на поверхні металу починають розвиватися корозійно-механічні дефекти у вигляді пітингів, виразок та каверн. Слід відзначити, що не зважаючи на різну природу експлуатаційних дефектів, зумовлених відшаруваннями захисних концентраторів напружень, всі види є типовими прикладами постійних концентраторів напружень, тобто місцями зародження руйнувань труби.

Розроблена класифікація відбивачів низькочастотної спрямованої хвилі технологічних трубопроводів дозволяє на її основі сформулювати контрольні та діагностичні образи експлуатаційних відбивачів з метою визначення технічного стану трубопроводів з використанням систем далекодуючого УЗК.

#### **Висновки.**

1. Показано, що технологічні трубопроводи із труб середнього діаметра складають значну частину обладнання підприємств нафтової, газової, хімічної, металургійної, енергетичної та інших важливих галузей народного господарства України.

2. Для оцінки технічного стану технологічних трубопроводів використовуються різноманітні методи неруйнівного контролю, які можна розділити на пасивні та активні.

3. Найбільш перспективним для визначення технічного стану технологічних трубопроводів

можна вважати розробку контрольно-діагностичного процесу на основі активних регіональних систем низькочастотного ультразвукового контролю спрямованими хвилями.

### Список використаних джерел

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник /В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филатов и др.; Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

2. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика /Під ред. З.Т.Назарчука. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2001. 1134 с.

3. Дубов А.А., Власов В.Т. О Классификации методов НК. В мире неразрушающего контроля. 2007. № 3. С. 63-64.

4. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО «Тиссо», 2004. 424 с.

5. Кулаев В.Г. Распределение намагниченности в длинных ферромагнитных стальных трубах, помещенных в любое магнитное поле, при их упругом и пластическом изгибах. Дефектоскопия. 2002. № 6. С. 65-80.

6. Садртдинов Р.А., Гейцан В.Б., Рыбалко В.Г., Новгородцев Д.В. Исследование напряженного состояния стенки трубы с неоднородными остаточными напряжениями при изгибе. Дефектоскопия. 2012. № 1. С. 75-86.

7. Садртдинов Р.А., Рыбалко В.Г., Новгородцев Д.В. Специфика работ по снижению уровня напряжений трубопроводов с использованием магнитных методов контроля. Дефектоскопия. 2013. № 3. С. 48-54.

8. Троїцький В.О., Бондаренко О.Г., Глуховський В.Ю. Особливості створення засобів для оцінки параметрів дефектів тепловим неруйнівним контролем. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин. Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 2012. С. 105-110.

9. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Машиностроение, 1976. 272 с.

10. Иванов В.И., Белов В.М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 187 с.

11. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Львів, СПОЛІОМ, 2005. 396 с.

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

13. Приходько В.Н., Кириллова Л.Г., Кузьминский С.А., Гиллар Г.А. Неразрушающий контроль трубопроводов на наличие коррозионных поражений. Дефектоскопия. 1990. № 8. С. 51-57.

14. Mudge P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A ljpg range method of the defection of corrosion under insulation in process pipework. Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.

15. Rose I.L. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge University Press. New York. 1999. pp. 77-82.

16. Nagai T., Hyodo M., Takamyra K. Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology. Hihakai Kensa. 2003. v. 52, № 12. pp. 667-671.

17. Бондаренко О.Г. Основні характеристики та особливості низькочастотного хвильового процесу в протяжних трубопроводах. Методи та прилади контролю якості. 2013. № 1. ;С. 5-23.

18. Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень /За ред. В.В. Панасюка. Львів: СПОЛІОМ, 2012. 316 с.

### References

1. Nerazrushayushchyy kontrol' i dyahnostyka: Spravochnyk /V.V.Klyuev, F.R.Sosnyn, V.N.Fylatov y dr.; Pod red. V.V.Klyueva. M.: Mashynostroenye, 1995. 488 s.

2. Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv: Dovidn. posibnyk. T. 5: Neruynivnyy kontrol' i tekhnichna diahnostyka /Pid red.. Z.T.Nazarchuka. L'viv: Fyzyko-mekhanichnyy instytut im. H.V.Karpenka NAN Ukrayiny, 2001. 1134 s

3. Dubov A.A., Vlasov V.T. O Klassyfykatsyy metodov NK. V myre

nerazruchayushcheho kontrolya. 2007. № 3. S. 63-64.

4. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizycheskye osnovy metoda mahnytnoy pamyaty metalla. M.: ZAO «Tyso», 2004. 424 s.

5. Kulaev V.H. Raspredelenye namahnychennosti v dlynnnykh ferromahnytnykh stal'nykh trubakh, pomeshchennykh v lyuboe mahnytnoe pole, pry ykh uprhom y plastycheskom yz-hybakh. Defektoskopyya. 2002. № 6. S. 65-80.

6. Sadrtynov R.A., Heytsan V.B., Rybalko V.H., Novhorodtsev D.V. Yssledovanye napryazhennoho sostoyannya stenky truby s neodnorodnymi ostatochnymi napryazhenyamy pry yz-hybe. Defektoskopyya. 2012. № 1. S. 75-86.

7. Sadrtynov R.A., Rybalko V.H., Novhorodtsev D.V. Spetsyfyka rabot po snyzhenyyu urovnya napryazhenyy truboprovodov s yspol'zovanyem mahnytnykh metodov kontrolya. Defektoskopyya. 2013. № 3. S. 48-54.

8. Troyits'ky V.O., Bondarenko O.H., Hlukhovs'ky V.YU. Osoblyvosti stvorenniya zasobiv dlya otsinky parametriv defektiv teplovym neruynivnym kontrolem. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstruktsiy, sporud i mashyn. Kyiv: IEZ im. YE.O.Patona NAN Ukrayiny, 2012. S. 105-110.

9. Hreshnykov V.A., Drobot YU.B. Akustycheskaya émyssyya. M.: Mashynostroenye, 1976. 272 s.

10. Yvanov V.Y., Belov V.M. Akustyko-émyssyonnyy kontrol' svarky y svarnykh soedynenyy. M.: Mashynostroenye, 1981. 187 s.

11. Skal's'ky V.R., Koval' P.M. Akustychna emisiya pid chas ruynuvannya materialiv, vyrobiv i konstruktsiy. L'viv, SPOLOM, 2005. 396 s.

12. Hodlevs'ky V.S., Troyits'ky V.O., Bondarenko O.H. Korelyatsiyi metody y tekhnolohiyi poshuku vytokiv u napirnykh truboprovodakh. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstruktsiy, sporud i mashyn. Kyiv: IEZ im. YE.O.Patona NAN Ukrayiny, 2009. S. 525-530.

13. Prykhod'ko V.N., Kyryllova L.H., Kuz'mynskyy S.A., Hyllar H.A.

Nerazruchayushchyy kontrol' truboprovodov na nalychye korrozyonnykh porazhenyy. Defektoskopyya. 1990. № 8. S. 51-57.

14. Mudge P.J., Lank A.M., Allyne D.N. A ljpg range method of the defection of corrosion under insulation in process pipework. Thermie Project: OG474/94, 5 th European Union Hydrocarbons Symposium, Edinburg, 26-28 November, 1996.

15. Rose I.L. Ultrasonic waves in solid media. Cambridge University Press. New York. 1999. pp. 77-82.

16. Nagai T., Hyodo M., Takamya K. Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology. Hihakai Kensa. 2003. v. 52, № 12. rr. 667-671.

17. Bondarenko O.H. Osnovni kharakterystyky ta osoblyvosti nyz'kochastotnoho khvyl'ovoho protsesu v protyazhnykh truboprovodakh. Metody ta prylady kontrolyu yakosti. 2013. № 1. ;S. 5-23.

18. Pratsездатnist' materialiv i elementiv konstruktsiy z hostrokintsevymy kontsentratoramy napruzhen' /Za red. V.V. Panasyuka. L'viv: SPOLOM, 2012. 316 s.