

ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ І ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА

УДК 620.179

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИДІВ ДЕФЕКТІВ ТРУБОПРОВОДІВ ПІДЗЕМНИХ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ

І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, Л.А. Витвицька, П.М. Райтер

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504708,
e-mail: tdm@nimg.edu.ua*

Розглянуто проблеми, які виникають під час проведення контролю технічного стану підземних теплових мереж з трубопроводами в пінополіуретановій тепловій ізоляції, прокладених безканалним способом. Проведено класифікацію видів дефектів, які найчастіше виникають в трубопроводах з пінополіуретановою ізоляцією. Вказано, що за зміною трьох інформативних параметрів (струм у стінках трубопроводу, звуковий тиск на поверхні ґрунту, температура приповерхневого шару ґрунту над тепломережею), вимірних вздовж ділянки контролю, можна встановити наявність дефектів в трубопроводах з пінополіуретановою ізоляцією. Наведено вирази для розрахунку інформативних параметрів. Розроблено метод ідентифікації видів дефектів у підземних теплових мережах на основі порівняльної бальної оцінки, вимірних вздовж ділянки контролю та розрахованих за аналітичними моделями значень інформативних параметрів індукційного, мікрофонного та теплового контактного методів контролю. Невизначеність, зумовлена алгоритмом ідентифікації видів дефектів за трьома інформативними параметрами, розрахована за схемою Бернуллі і складає 17,9 %. Описано установку для проведення експериментальних досліджень зміни рівня інформативних параметрів за наявності всіх розглянутих видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж. Для практичної перевірки розробленого методу ідентифікації видів дефектів трубопроводів підземних теплових мереж створено інформаційно-вимірну систему, яка пройшла успішну апробацію на об'єктах комунального господарства.

Ключові слова: метод, трубопровід, пінополіуретанова ізоляція, технічний стан, ідентифікація дефектів, інформативний параметр.

Рассмотрены проблемы, возникающие при проведении контроля технического состояния подземных тепловых сетей с трубопроводами в пенополиуретановой тепловой изоляции, проложенными бесканальным способом. Разработана классификация видов дефектов, которые чаще всего возникают в трубопроводах с пенополиуретановой изоляцией. Указано, что по изменению трех информативных параметров (ток в стенках трубопровода, звуковое давление на поверхности почвы, температура приповерхностного слоя почвы над теплотсетью), измеренных вдоль участка контроля, можно установить наличие дефектов в трубопроводах с пенополиуретановой изоляцией. Приведены выражения для расчета информативных параметров. Разработан метод идентификации видов дефектов в подземных тепловых сетях на основе сравнительной балльной оценки измеренных вдоль участка контроля и рассчитанных по аналитическим моделям значений информативных параметров индукционного, микрофонного и теплового контактного методов контроля. Неопределенность, предопределенная алгоритмом идентификации видов дефектов по трем информативным параметрам, рассчитанная по схеме Бернулли, составляет 17,9 %. Описана установка для проведения экспериментальных исследований изменения уровня информативных параметров при наличии всех рассмотренных видов дефектов трубопроводов подземных тепловых сетей. Для практической проверки метода идентификации видов дефектов в трубопроводах подземных тепловых сетей разработана информационно-измерительная система, которая прошла успешную апробацию на объектах коммунального хозяйства.

Ключевые слова: метод, трубопровод, пенополиуретановая изоляция, техническое состояние, идентификация дефектов, информативный параметр.

In the recent years great attention has been paid to the issues arising during the technical inspection of the underground heating networks with pipelines isolated in polyurethane foam run by the means of channelless pipe lying. The defects arisen most often in the pipeline with polyurethane isolation have been classified. Having changed three information-bearing parameters (the current in the pipeline walls, acoustical pressure on the soil surface, the temperature of the near-surface soil above the heating network) which were measured along the inspection area the

availability of defects in the pipelines with polyurethane foam isolation can be determined. The formulae have been given for information-bearing parameters calculation. The method for all types of defects identification has been developed in the underground heating networks which is based on the comparative rating measured along the inspection area and calculated using analytical models of the information-bearing parameters for inductive, microphone and thermal contact inspection methods. Test uncertainty predetermined by the identification algorithm of types of defects according to three information-bearing parameters and calculated by the Bernoulli scheme equals 17.9%. The installation has been described for making test research of information-bearing parameters variations if all types of studied defects of pipelines heating systems are available. To inspect the developed identification method of all types of pipeline defects in the underground heating networks the information and measuring system has been created and it was successfully tested at the community facilities.

Key words: method, pipeline, polyurethane insulation, technical condition, defects identification, information-bearing parameter.

Одним з факторів, що забезпечують стабільний розвиток суспільства, є створення комфортних умов для функціонування підприємств та проживання населення. Значною мірою цьому сприяє надійна робота систем тепlopостачання. Вирішення завдання надійності роботи таких систем неможливе без оперативного виявлення їх дефектів.

Найменш надійним елементом систем тепlopостачання є підземні теплові мережі, з якими трапляється більше 70% всіх аварійних ситуацій [1]. Це призводить до значних економічних збитків через перевитрати теплоносія та енергоресурсів, виконання позапланових ремонтних робіт і погіршення умов проживання та праці людей.

Для зменшення теплових втрат заміну старих тепломереж з мінераловатною ізоляцією і прокладання нових здійснюють більш ефективними трубопроводами з пінополіуретановою (ППУ) ізоляцією. Нормативні терміни служби таких трубопроводів сягають 25 – 30 років. Однак, внаслідок порушень технології виготовлення, монтажу та укладання, а також через те, що значна частина трубопроводів виготовляється зі старих газопровідних труб, у трубопроводах з ППУ-ізоляцією виникають дефекти вже у перші роки експлуатації [2].

Трубопроводи з ППУ-ізоляцією характеризуються тим, що за рахунок багатшарової структури і специфічних характеристик в них виникають дефекти, які не були властиві тепломережам з мінераловатною ізоляцією. Для економії енергоносіїв, раціонального планування ремонтів та запобігання виникненню аварійних ситуацій тепломереж необхідно проводити їх постійний контроль. Найбільш продуктивним і економічно вигідним на даний час є застосування методів безконтактного неруйнівного контролю.

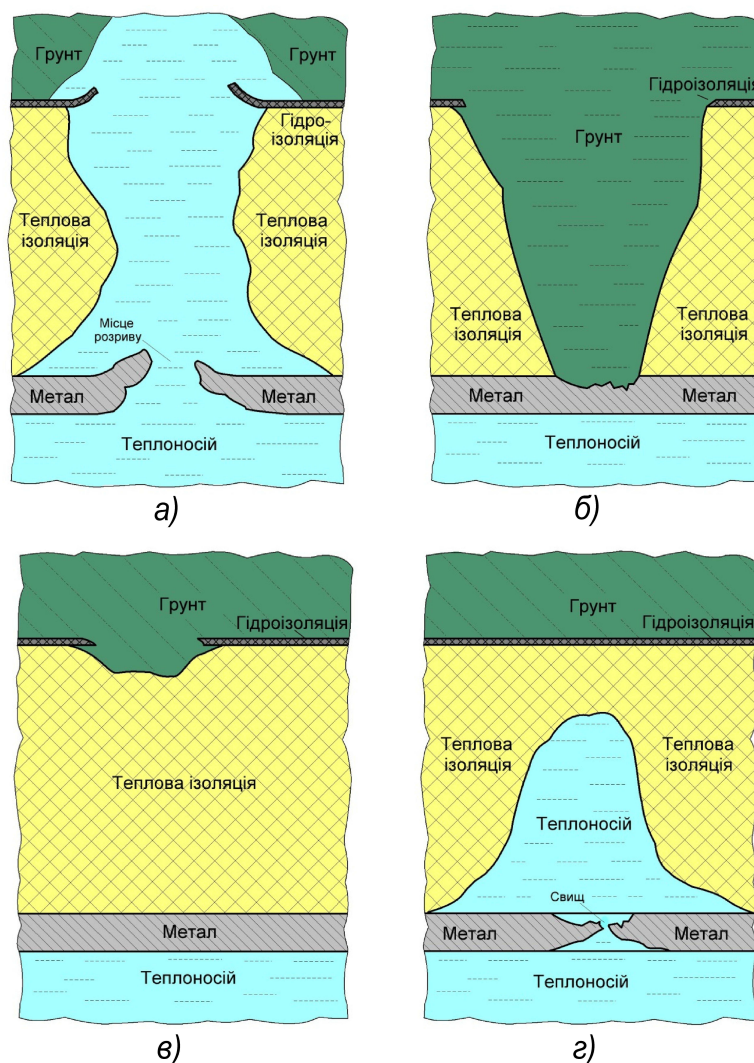
Дослідженню питання контролю підземних теплових мереж присвячено ряд робіт зарубіжних та вітчизняних вчених, таких як Безпрозванний А.О., Трикоз П.І., Воробйов Л.І., Декуша Л.В., Кухарев Ю.О. (Україна), Самойлов Е.В., Иванов В.В., Шкрєбко С.В., Чернышева Л. А. (Росія), Gregory R Stockton, John Rudlin (США), Hua He, Qi Ding (Китай). Однак, їх увага зосереджувалась, в основному, на розробленні та технічній реалізації теплових і акустичних методів контролю теплових мереж каналного прокладання [3].

Аналіз сучасних досліджень, нормативних документів та публікацій показав, що на даний

час немає єдиної класифікації дефектів, які виникають в підземних теплових мережах з трубопроводами в ППУ-ізоляції. Також відсутні ефективні методики контролю трубопроводів з ППУ-ізоляцією, прокладених безканальним способом, які б дозволяли з високим ступенем достовірності виявляти місця пошкоджень, визначати вид дефекту, і на основі цього встановлювати потенційно небезпечні ділянки. Описані в нормативних документах методики гідравлічних випробувань [4, 5] не дозволяють повною мірою оцінити технічний стан такого складного об'єкта, як трубопроводи з ППУ-ізоляцією, прокладені безканально. Це пояснюється наявністю потужного шару гідроізоляції, який, навіть під час розриву тіла металевго трубопроводу, може не зруйнуватись, через що неможливо виявити місцезнаходження дефекту. Крім того, навіть при руйнуванні трубопроводу і його тепло- та гідроізоляції, вода потрапляє відразу в оточуючий ґрунт, при цьому шум струменя води є незначним і його дуже важко виявити з поверхні ґрунту мікрофонним методом. Значна адгезія пінополіуретану до стінок металевго трубопроводу збільшує розсіювання ультразвукових хвиль, що робить непридатним застосування акустично-кореляційних методів контролю. Отже, значною проблемою контролю трубопроводів з ППУ-ізоляцією залишається пошук інформативних параметрів про наявність і вид дефекту.

Дана стаття присвячується розробленню методу ідентифікації видів дефектів, які виникають в підземних теплових мережах з трубопроводами в ППУ-ізоляції, прокладених безканально, на основі трьох інформативних параметрів, отриманих від дії фізичних полів різної природи. Застосування методу ідентифікації дасть змогу запобігати виникненню аварій на тепломережах та залежно від виду виявленого дефекту планувати ремонті роботи і встановлювати їх першочерговість.

Сучасні підходи до визначення технічного стану складних об'єктів спрямовані на розробку комплексних методів, які передбачають врахування декількох параметрів одночасно, що відносяться до різних видів фізичних полів. Тому для контролю тепломереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції, прокладених безканально, обрано комплекс інформативних параметрів, а саме, струм у стінках трубопроводу та звуковий тиск на поверхні ґрунту, які отримуються індукційним та мікрофонним методами контролю. До переліку інформативних параметрів включено



а – дефект виду “розрив трубопроводу”; б – дефект виду “руйнування теплової та гідроізоляцій”; в – дефект виду “руйнування гідроізоляції”; г – дефект виду “мігруюча вода”

Рисунок 1 – Основні види дефектів трубопроводів тепломереж з ППУ – ізоляцією

температуру приповерхневого шару ґрунту над тепломережею (тепловий контактний метод), яка дає змогу отримати додаткову інформацію про вид дефекту.

З проведених досліджень [6-8] видно, що за зміною трьох інформативних параметрів, вимірних вздовж ділянки контролю, можна встановити наявність дефекту, проте не можна ідентифікувати однозначно його вид. У зв'язку з цим виникла необхідність розробити метод ідентифікації виду виявленого дефекту трубопроводу з ППУ-ізоляцією із застосуванням комплексу обраних інформативних параметрів.

На основі проведеного анкетування та аналізу літературних джерел і нормативних документів здійснена класифікація видів основних дефектів, які найчастіше виникають в трубопроводах з ППУ-ізоляцією. Такими дефектами (рис. 1) є:

- „розрив трубопроводу”,
- „руйнування тепло- та гідроізоляцій”,
- „руйнування гідроізоляції”,
- „мігруюча вода”.

Дефекти виду “розрив трубопроводу” (рис. 1, а) є наслідками дії корозії, знакозмінних механічних навантажень трубопроводу та гідродарів. Основними причинами виникнення внутрішньої корозії тіла трубопроводу є наявність солей, повітря та хімічних домішок у теплоносії, а зовнішньої – доступ ґрунтового електричного струму до тіла труби та дія блукаючих струмів. При цьому розрив тіла трубопроводу (поздовжня чи поперечна тріщина або свищ) може настати в момент зменшення товщини стінки трубопроводу нижче допустимого рівня на певній площі. Тоді в тілі трубопроводу виникає розрив, через який теплоносій потрапляє до затрубного простору. Під дією значного тиску теплоносія руйнується спочатку теплова, а потім гідроізоляція, відкриваючи йому доступ до оточуючого ґрунту. За межами гідроізоляції відбувається інтенсивне зволоження ґрунту та його вимивання, що призводить до зміни густини ґрунту і утворення водонасиченого пласта. Це є небезпечним явищем, оскільки може спричинити провалювання ґрунту на значних

ділянках з частковим або повним руйнуванням пролягаючих поряд комунікацій, фундаментів, дорожнього покриття. Крім того, внаслідок розриву трубопроводу, припиняється теплопостачання споживачів. Виявлення і ліквідація дефектів виду “розрив трубопроводу” є першочерговим завданням комунальних служб.

Виникнення дефектів виду “руйнування теплової та гідроізоляції” (рис. 1, б) у трубопроводах з ППУ-ізоляцією пов’язане з порушенням технології їх укладання, з’єднання, герметизації та засипання. Також появи таких дефектів сприяє вібрація від руху транспорту і проведення земляних робіт на території пролягання тепломережі. В результаті виникнення дефекту тепло- та гідроізоляції на певній ділянці трубопроводу руйнуються, відкриваючи доступ ґрунтового електроліту до тіла металевих трубопроводів, що спричиняє його корозію. Швидкість розвитку корозії залежить від площі контакту металу з ґрунтом, його вологості, температури, наявності солей у ґрунті тощо. А оскільки температура металевих трубопроводів тепломережі сягає 90°C, то інтенсивність корозії значно зростає. При цьому за короткий проміжок часу у місці дефекту може з’явитись незначний отвір, крізь який теплоносії потраплятиме в оточуючий ґрунт. Подальша корозія тіла трубопроводу у місці дефекту може призвести до виникнення дефекту виду “розрив трубопроводу”.

Дефекти виду “руйнування гідроізоляції” виникають внаслідок механічного пошкодження її як в період виконання монтажних робіт, так і в період експлуатації від надмірного тиску ґрунту від руху транспорту на окремих ділянках тепломережі (рис.1,в). Через пошкоджену гідроізоляцію ґрунтовий електроліт має змогу просочуватися у шар ППУ-ізоляції, поступово руйнуючи його і створюючи умови для контакту зовнішньої стінки металевих трубопроводів з ґрунтом. Оскільки руйнування шару ППУ-ізоляції відбувається не відразу, то дефекти виду “руйнування гідроізоляції” є найменш небезпечними.

Одним з небезпечних дефектів трубопроводів в ППУ-ізоляції є поява “мігруючої води” у просторі між металевим трубопроводом та гідроізоляцією (рис. 1, г). При транспортуванні і переміщенні трубопроводів внаслідок вібрації і ударів відбувається відшарування теплової ППУ-ізоляції від стінок трубопроводу. В результаті цього волога з навколишнього середовища може проникнути в зони відшарування ще до монтажу трубопроводу в тепломережу та спричинити зволоження теплоізоляції. Результатом зволоження є поява цяткової корозії. Цяткова корозія виникає як в тілі трубопроводу, так і у місцях зварних з’єднань через дефекти металу і порушення водно-хімічного режиму. При цьому утворюються свищі, через які відбувається постійний витік незначної кількості теплоносія з трубопроводу, який, зволожуючи ППУ-ізоляцію, поступово її руйнує і поширюється між металевим трубопроводом та шаром гідроізоляції на значні відстані (рис. 1, г). В ре-

зультаті такого процесу утворюються хімічні сполуки, які спричиняють інтенсивну корозію зовнішніх стінок трубопроводу. Оскільки швидкість корозійних явищ залежить від температури, то у працюючому трубопроводі тепломережі вони розвиваються за короткий час. Це може призвести до розгерметизації трубопроводу на значній площі і виникнення аварії на тій ділянці тепломережі, де не існує підозри на пошкодження. Виявленню і ліквідації дефектів виду “мігруюча вода” повинна приділятися основна увага.

Наведені дефекти змінюють технічний стан тепломережі і створюють умови для виникнення аварій. Дана класифікація лягла в основу розробленого методу ідентифікації видів дефектів.

Метод ідентифікації видів дефектів призначений для прогнозування певного виду дефекту трубопроводу тепломережі на основі опрацювання інформативних параметрів індукційного, мікрофонного та теплового контактного методів контролю, вимірювань вздовж ділянки контролю у визначених точках із заданим кроком. Для підвищення достовірності ідентифікації вимірювання проводяться при різних режимах.

Вид дефекту, який виявлений у процесі контролю, характеризується набором інформативних параметрів, отриманих при різних режимах вимірювання в місці ймовірного дефекту. Оскільки виміряні інформативні параметри не дають можливості однозначно ідентифікувати вид дефекту, а велика кількість інформативних параметрів ускладнює процес їх аналізу, то виникає необхідність в їх скороченні або узагальненні. Для оцінки виду дефекту, яка би поєднувала всі отримані інформативні параметри, доцільним є застосування комплексного показника (комплексного параметра).

Розрахунок комплексного показника здійснюмо на основі методів кваліметрії [9-11]. Алгоритм розрахунку комплексного показника та видачі висновку про вид дефекту включає наступні етапи:

- вибір інформативних параметрів;
- визначення вагомості кожного з них у загальній оцінці виду дефекту;
- визначення функцій переходу від розмірних до безрозмірних параметрів;
- розрахунок комплексного параметра;
- розроблення алгоритму обчислення комплексного параметра.

Для ідентифікації виду дефекту використовуються виміряні інформативні параметри на ділянці контролю. Такими параметрами є струм у стінках трубопроводу, акустичний тиск на поверхні ґрунту та температура приповерхневого шару ґрунту, отримані при різних режимах вимірювання вздовж ділянки контролю з визначеним кроком.

Коефіцієнт вагомості характеризує частковий вклад кожного інформативного параметра в комплексний параметр. Оскільки визначення коефіцієнтів вагомості є довготривалим і складним процесом, який ґрунтується на експерт-

них оцінках, то при розрахунку комплексного параметра прийнято однакові коефіцієнти вагомості для всіх параметрів, сума яких становитиме 1.

Для обчислення комплексного параметра необхідно здійснити перехід від розмірних інформативних параметрів до безрозмірних показників. Серед безрозмірних показників найбільш поширеними є бали.

Для проведення бальної оцінки вимірних інформативних параметрів застосовано методику порівняння із інформативними параметрами, розрахованими за теоретичними моделями. Для цього проведено теоретичні дослідження з метою виявлення впливу зміни значень діагностичних ознак на зміну інформативних параметрів для контролю індукційним, мікрофонним та тепловим методами. Вид дефекту можна визначити за зміною значення інформативних параметрів, яка буде зумовлена поведінкою певних діагностичних ознак (геометричні параметри теплової мережі, температурні характеристики, вологість і густина ізоляції, піщаної та ґрунтової засипок тощо) [12].

В результаті теоретичних досліджень отримано аналітичну залежність струму у стінках трубопроводу, який утворює змінне магнітне поле генератора, від зміни значень діагностичних ознак, що зумовлені наявністю дефекту [8]:

$$I_1 = \frac{E}{Z_{\Gamma} + Z_T + Z_{\text{ГЕН}} + \frac{(Z_{\text{ІЗ}} + Z_3) \cdot Z_6}{Z_{\text{ІЗ}} + Z_3 + Z_6}}, \quad (1)$$

де E - вихідна напруга генератора при навантаженні,

Z_T - питомий лінійний опір трубопроводу,

Z_{Γ} - питомий лінійний опір ґрунту,

$Z_{\text{ІЗ}}$ - питомий лінійний опір ізоляції трубопроводу,

Z_3 - питомий лінійний опір ґрунту струмові стікання,

Z_6 - опір елемента навантаження,

$Z_{\text{ГЕН}}$ - внутрішній опір генератора.

У результаті проведених теоретичних досліджень підтверджено можливість застосування індукційного методу контролю для виявлення дефектів виду „розрив трубопроводу” і „руйнування теплової та гідроізоляції”. Однак за рахунок значного електричного опору ізоляцій ППУ-трубопроводу дефекти виду „руйнування гідроізоляції” та „мігруюча вода” не впливають на зміну інформативного параметра.

Шляхом моделювання процесу поширення збуджених магнітостриктором акустичних хвиль у тілі металевого трубопроводу від поверхні трубопроводу до поверхні ґрунту, отримано аналітичну залежність акустичного тиску на поверхні ґрунту від інтенсивності акустичного збудження трубопроводу, яка враховує акустичні характеристики пройдених середовищ [7]:

$$p_{\Pi} = \sqrt{\frac{J \cdot c_T}{2 \cdot \pi^2 \cdot \rho_T \cdot r_T^2 \cdot f^2}} \times \times \rho_T \cdot c_T \cdot \prod_{i=1}^m T_i \cdot e^{-\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot l_i)}, \quad (2)$$

де J – інтенсивність акустичного збудження;
 c_T – швидкість звуку в матеріалі трубопроводу;

ρ_T – густина матеріалу трубопроводу;

r_T – зовнішній радіус трубопроводу;

f – частота сигналу збудження;

T_i – коефіцієнт проходження за акустичним тиском через границю розподілу середовищ, значення якого залежить від акустичних імпедансів середовищ;

α_i – коефіцієнт загасання акустичної хвилі в пройденому середовищі;

l_i – довжина ходу акустичної хвилі в пройденому середовищі;

n – кількість середовищ, через які поширюється акустична хвиля;

m – кількість меж поділу середовищ.

Врахування діагностичних ознак в аналітичній залежності (2) дало змогу з достатньою точністю відтворити процес поширення акустичних хвиль та врахувати вплив кожного виду дефекту на результуюче значення акустичного тиску на поверхні ґрунту.

Розрахунок температури приповерхневого шару ґрунту здійснюється за виразами, наведеними в [6, 13], які враховують взаємний вплив температури подавального і зворотного трубопроводів.

Зміна значень діагностичних ознак дала можливість промодельовувати той чи інший вид дефекту. Отримані значення порівнюються із результатами вимірювання на об'єкті контролю у визначених точках. Враховуючи те, що на реальному об'єкті параметри середовища, в якому поширюються сигнали, можуть бути нестабільними вздовж ділянки контролю, встановлено діапазон зміни інформативних параметрів. При цьому за межу подібності прийнято середнє арифметичне між двома найближчими значеннями інформативного параметра.

Для числової оцінки найімовірнішого виду дефекту запропоновано застосувати таку бальну оцінку: від 1 балу за мінімальної подібності до 5 балів для максимальної подібності. При значеннях параметра, які значно відрізняються від прогнозованих, ставиться 0 балів, що свідчить про аномальність інформативного параметра і вимагає додаткового аналізування. На основі порівняння розраховано показники подібності для кожного виду дефекту.

Наявність даних про теплові втрати та температури теплоносія на вході і виході подавального та зворотного трубопроводів, отриманих в теплових замірних пунктах, дала можливість застосувати додаткові бали для дефектів виду



Рисунок 2 – Послідовність методу ідентифікації виду дефекту

„розрив трубопроводу” і „руйнування теплової та гідроізоляції».

Щоб встановити додаткові бали для дефектів виду „мігруюча вода” та „руйнування гідроізоляції”, використано спектральний аналіз, заснований на перетворенні Фур'є для вимірюваного акустичного тиску вздовж ділянки контролю. Перетворення Фур'є полягає в розкладанні сигналу на елементарні гармонічні функції, що дає змогу оцінити аналізований амплітудний та частотний склад сигналу, а також виокремити корисний сигнал із сигналу, спотвореного завадами та шумами.

Як комплексний параметр застосовано відношення суми набраних балів до максимальної суми балів. Розрахувавши комплексні параметри за всіма видами дефектів, що аналізуються, можна зробити висновок про найімовірніший з них.

Послідовність операцій методу ідентифікації та формування висновку про вид дефекту наведено на рис. 2. Метод реалізовано в середовищі Microsoft Excel, оскільки дане програмне середовище дає можливість реалізувати необхідні розрахунки (вбудований редактор формул), провести аналіз даних (перетворення Фур'є), наглядно відобразити необхідну інформацію (майстер діаграм) та не потребує високої кваліфікації фахівців.

Першим етапом є вивчення технічної документації на об'єкт контролю. За даними, наведеними в паспорті теплової мережі, заповнюється перша закладка „Вхідні дані” розробленого програмного забезпечення, де вказуються геометричні параметри та режими експлуатації тепломережі, а також вводяться дані про теплові втрати, температури теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах, отримані із замірного пункту.

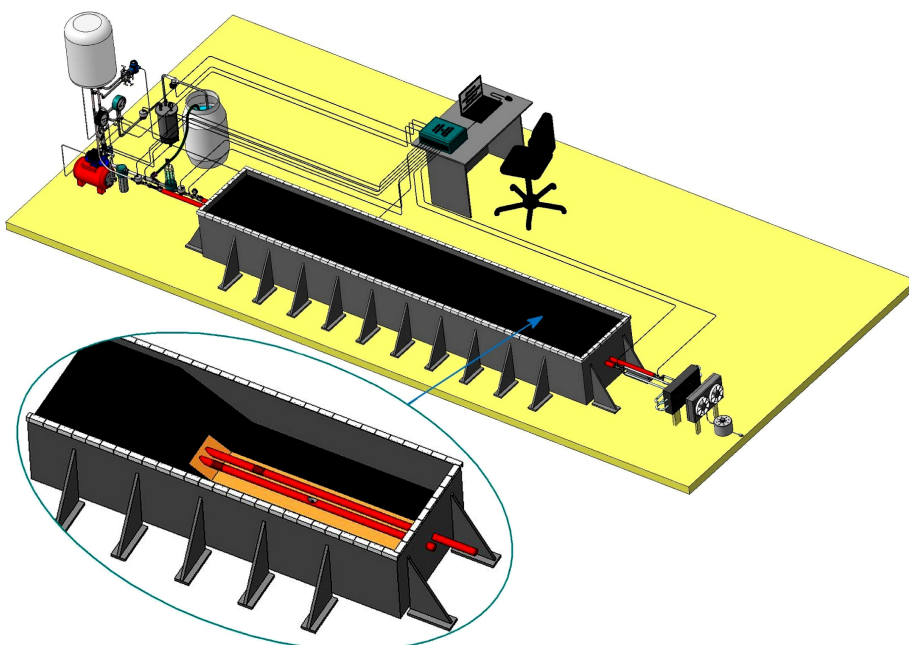


Рисунок 3 – 3D-модель установки для дослідження підземних теплових мереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції

На другому етапі здійснюється перенесення всіх вимірних інформативних параметрів (струму у стінках трубопроводу, акустичного тиску на поверхні ґрунту, температури приповерхневого шару ґрунту) при різних режимах вимірювання у програму. У такій спосіб формується закладка „Інформативні параметри”, де автоматично визначаються значення інформативних параметрів у найімовірніших місцях дефекту та будуються графічні залежності значень інформативних параметрів вздовж ділянки контролю. Дані графічні залежності дають можливість наглядно оцінити місця можливих дефектів та встановити відстань до них від початкової точки контролю.

Всі наступні етапи програми виконуються самостійно без участі фахівця, що дає можливість усунути суб’єктивний фактор при формуванні висновку за результатами контролю.

У закладці „Розрахунки” відбувається розрахунок всіх інформативних параметрів при різних режимах вимірювання за аналітичними моделями як для бездефектної ділянки, так і для всіх видів дефектів шляхом імітації зміни інформативних ознак. Ці значення переносяться у закладку „Теоретичні дані», де проводиться розрахунок меж подібності.

Потім здійснюється бальна оцінка за наведеною вище методикою і формується закладка „Бальна оцінка”. При розрахунку комплексного параметру враховуються додаткові бали, отримані шляхом аналізу вхідної інформації з замірних пунктів та результатів перетворення Фур’є для даних акустичного контролю.

Останнім етапом є формування висновку за результатами контролю. У висновку відображається інформація про об’єкт контролю, засоби контролю, нормативні документи, фахівців, які проводили контроль, експлуатаційні

характеристики ділянки контролю, а також самі результати контролю, згруповані за методами. Результати контролю – це графічні залежності всіх вимірних інформативних параметрів вздовж ділянки контролю та табличні значення параметрів у місцях найімовірніших дефектів. Також наводяться результати розрахунків комплексного параметра на основі проведеної бальної оцінки для всіх видів дефектів та будуються пелюсткова діаграма, яка дає можливість чисельно і наглядно оцінити найімовірніший вид дефекту. Як підсумок проведених досліджень формується висновок про наявність чи відсутність виявлених дефектів, що характеризує технічний стан досліджуваного об’єкта контролю.

Для перевірки розробленого методу ідентифікації видів дефектів підземних теплових мереж необхідно було провести комплекс експериментальних досліджень. Провести дослідження на реально діючих тепломережах з імітацією різних видів дефектів виявилось неможливим, оскільки це вимагало виведення їх з експлуатації на тривалий час і припинення теплопостачання споживачів. Щоб провести дослідження підземних теплових мереж на фізичній моделі обраними методами неруйнівного контролю з діапазоном зміни режимів експлуатації, близьких до реальних, створено установку, яка відтворює роботу пункту теплопостачання одного споживача двотрубною підземною тепловою мережею закритого типу, прокладеною безканально (рис. 3). Для відтворення основних видів дефектів, які найчастіше зустрічаються при експлуатації підземних теплових мереж з трубопроводами в ППУ-ізоляції, виготовлено зразки-імітатори дефектів, на які розроблено технічні паспорти [14].



Рисунок 4 – Амплітудні спектри при дефекті виду „мігруюча вода” та „руйнування гідроізоляції”

На дослідній установці проведено експериментальні дослідження зміни рівня інформативних параметрів за наявності всіх описаних вище дефектів [15]. Результати експериментів підтвердили теоретичні викладки щодо вибору комплексу інформативних параметрів як оптимальних для виявлення дефектів. На основі критерію Фішера підтверджено, що встановлені аналітичні залежності для розрахунку значень інформативних параметрів є адекватними реальним процесам при контролі підземних тепло-вих мереж.

За допомогою розробленого програмного забезпечення проведено ідентифікацію видів дефектів. Отримані при різних режимах вимірювання інформативні параметри були використані для ідентифікації видів дефектів за розробленим методом.

Наявність даних про теплові втрати на контрольованій ділянці та температури теплоносія на вході і на виході подавального та зворотного трубопроводів дало можливість застосувати додаткові бали для дефектів виду „розрив трубопроводу” і „руйнування тепло- та гідроізоляції”. Щоб встановити додаткові бали для дефектів виду „мігруюча вода” та „руйнування гідроізоляції”, використано спектральний аналіз із застосуванням перетворення Фур'є для вимірюного акустичного тиску вздовж ділянки контролю (рис. 4).

Як видно з рис. 4, для дефекту виду „руйнування гідроізоляції” максимальна спектральна щільність зосереджена в низькочастотній області, а для дефекту виду „мігруюча вода” - у високочастотній області. Це зумовлено різкою зміною інформативного параметру при дефекті виду „руйнування гідроізоляції” на мінімальній довжині та більшою протяжністю і гладкістю зміни інформативного сигналу для дефекту виду „мігруюча вода”.

Отримані пелюсткові діаграми за результатами проведеної ідентифікації для кожного виду дефекту наведено на рис. 5.

Доцільність використання вищенаведеної бальної системи при встановленні виду дефекту визначена на основі загальних положень теорії ймовірності, згідно з якою визначається ймовірність появи певної події на основі можливих варіантів подій [16].

Оскільки при п'ятибальній оцінці 24 вимірюваних інформативних параметрів і рівномож-

ливій появі будь-яких видів дефектів кількість можливих оцінок складає $24 \cdot 5 = 120$, то при цьому поява хибної оцінки складе $24 \cdot 4 = 96$. Таким чином ймовірність виставлення невідповідної (хибної) оцінки становитиме:

$$p = \frac{m}{n} = \frac{C_{96}^{24}}{C_{120}^{24}} = \frac{96!}{24!(96-24)!} \div \frac{120!}{24!(120-24)!} = 0,27. \quad (3)$$

За схемою Бернуллі розраховано найімовірніше число появи хибної оцінки при вимірюваннях всіх інформативних параметрів з нерівності:

$$n \cdot p - q \leq k \leq n \cdot p + q, \quad (4)$$

де n - кількість вимірюваних інформативних параметрів, які використовуються для ідентифікації виду дефекту;

p - ймовірність виставлення хибної оцінки;

$q = 1 - p$ - ймовірність виставлення вірної оцінки.

Підставивши числові значення у нерівність (4), отримаємо:

$$24 \cdot 0,27 - 0,73 \leq k \leq 24 \cdot 0,27 + 0,73, \\ 5,75 \leq k \leq 7,21.$$

Таким чином, найімовірніше число появи хибної оцінки при вимірюваннях всіх інформативних параметрів рівне 6.

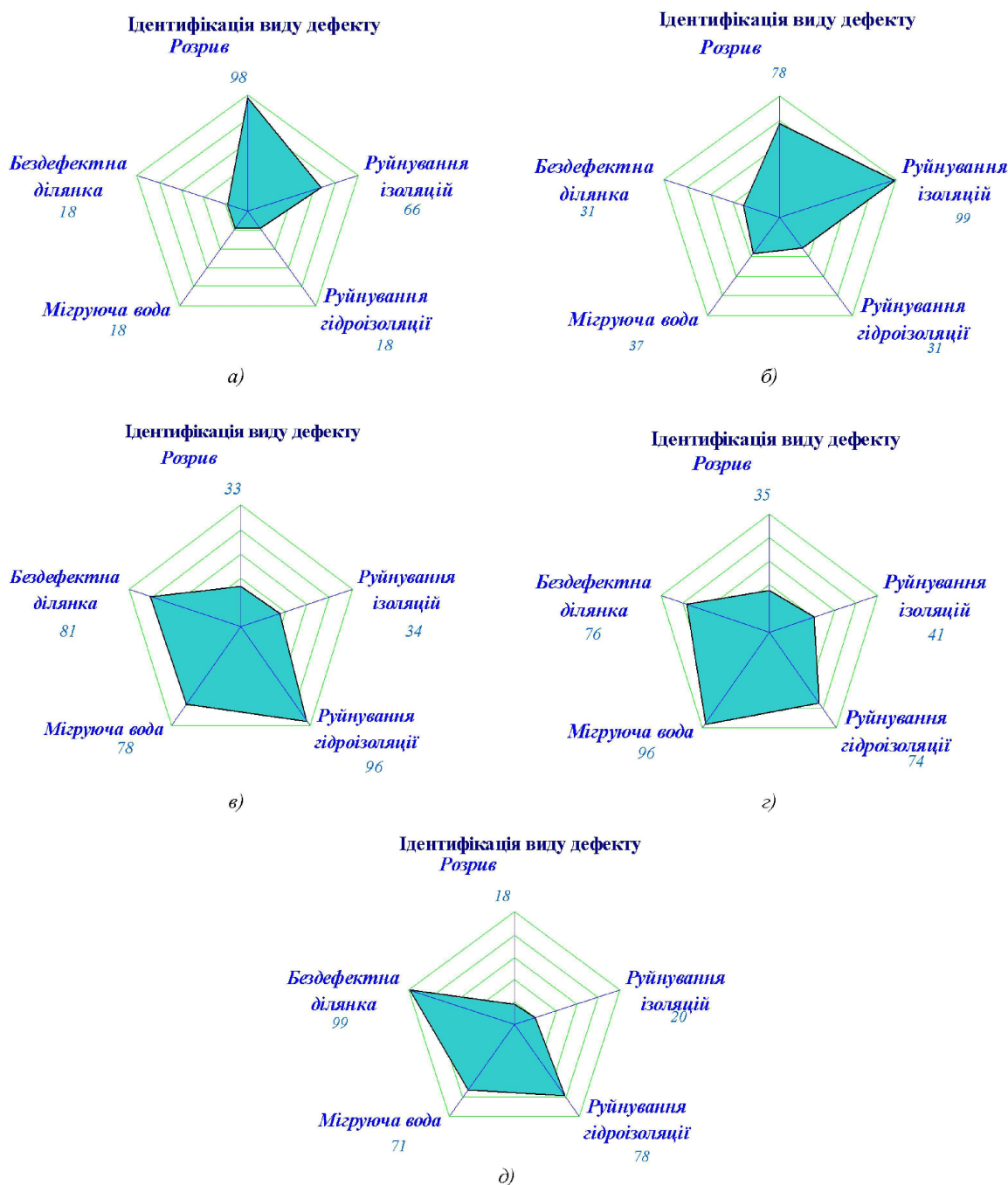
Невизначеність, зумовлену алгоритмом ідентифікації видів дефектів за всіма інформативними параметрами, розраховано як ймовірність найімовірнішого числа появи хибної оцінки за схемою Бернуллі за наближеною формулою:

$$p_n(k) = \frac{\varphi(x)}{\sqrt{n \cdot p \cdot q}}, \quad (5)$$

де $x = \frac{k - n \cdot p}{\sqrt{n \cdot p \cdot q}};$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} - \text{функція Гауса.}$$

За таблицями [16] знаходимо:



Дефекти: а – “розрив трубопроводу”; б – “руйнування теплової та гідроізоляцій”; в – “руйнування гідроізоляції”; г – “мігруюча вода”; д – бездефектна ділянка контролю

Рисунок 5 – Результати проведеної ідентифікації дефектів різних видів

$$\varphi(x) = 0,3894 \text{ при } x = \frac{6 - 24 \cdot 0,27}{\sqrt{24 \cdot 0,27 \cdot 0,73}} = -0,22.$$

$$\text{Звідси, } p_{24}(6) = \frac{0,3894}{\sqrt{24 \cdot 0,27 \cdot 0,73}} = 0,179.$$

Отже, невизначеність, зумовлена алгоритмом ідентифікації видів дефектів за трьома інформативними параметрами, складає 17,9 %.

Для практичної реалізації розробленого методу ідентифікації видів дефектів за трьома інформативними параметрами розроблено інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) [17, 18].

Промислову апробацію ІВС проведено на об'єктах ДМП „Івано-Франківськтеплокомуненерго”, КП „Водотеплосервіс” на території міста Калуш та нафтоперекачувальної станції „Куровичі” філії „Магістральні нафтопроводи „Дружба” ВАТ „Укртранснафта”. На всіх об'єктах за допомогою розробленої ІВС було виявлено ділянки з дефектами, які ідентифіковано за видами. Достовірність результатів контролю перевірялась наступним шурфуванням у виявлених місцях імовірного існування дефектів трубопроводів теплових мереж. Результати шурфування підтвердили наявність виявлених дефектів.

ВИСНОВКИ

На основі проведеної класифікації видів дефектів, які найчастіше виникають у трубопроводах з ППУ-ізоляцією, розроблено метод ідентифікації видів дефектів підземних теплових мереж безканальної прокладки, який ґрунтується на порівняльній бальній оцінці вимірних вздовж ділянки контролю та розрахованих за аналітичними моделями значень інформативних параметрів індукційного, мікрофонного та теплового контактних методів контролю. Застосування розробленого методу дозволить оцінити технічний стан трубопроводів, виявляти потенційно небезпечні ділянки тепломереж і завдяки своєчасному втручання запобігати виникненню аварійних ситуацій, а у залежності від виду виявленого дефекту ефективно планувати ремонтні роботи та встановлювати їх першочерговість.

Література

- 1 Євтухова Т.О. Сучасний стан комунальної енергетики України / Т.О.Євтухова, А.І. Симборський // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – №17. – С. 31-36.
- 2 Кулик М.М. Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні / М.М. Кулик, Г.О. Куц, В.Д. Білодід // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – №14. – С. 13-24.
- 3 Ващишак І.Р. Аналіз методів контролю технічного стану підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 2 (13). – С. 64-69.
- 4 Правила будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води: НПАОП 0.00-1.11-98. – [Чинний від 2007-10-01]. – Комітет з нагляду за охороною праці М-ва праці та соц. політики України: із змінами від 2007-10-01. – Х.: Видавництво «Індустрія», 2008. – 128 с.
- 5 Теплові мережі: ДБН В.2.5-39-2008. – [Чинний від 2009-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 55 с.
- 6 Ващишак І.Р. Визначення стану підземних теплових мереж шляхом аналізу їх теплових полів / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – №23. – С. 39-43.
- 7 Ващишак І.Р. Визначення технічного стану підземних теплових мереж шляхом аналізу їх акустичних характеристик / І.Р. Ващишак // Вісник НТУ ХП. – 2012. – №41. – С. 86-99. – (Серія «Електроенергетика та вимірювальна техніка»).
- 8 Ващишак І.Р. Особливості застосування електромагнітного контролю для виявлення дефектів в підземних теплових мережах / І.Р. Ващишак // Методи та прилади контролю якості. – 2012. – №28. – С. 61-70.
- 9 Фомин В.Н. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация [курс лекций] / В.Н. Фомин. – М.: ЭКМОС, 2000. – 320 с.
- 10 Кириллов В.И. Квалиметрия и системный анализ: учебное пособие / В. И. Кириллов. – Минск: Новое знание ИНФРА-М, 2011. – 440 с.
- 11 Калейчик М.М. Квалиметрия: учебное пособие [4-е изд., стереотип] / М. М. Калейчик; ред.: И. П. Дежкина, А. И. Афанасьева. – М.: МГИУ, 2006. – 200 с.
- 12 Ващишак І.Р. Розробка структурно-слідчої схеми параметрів діагностики підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів ЛЕОТЕСТ-2011: 16 Міжнар. наук.-техн. конф., Славське Львівської області, 21-26 лютого 2011 р.: матер. конф. - Славське Львівської області, 2011. – С. 181-183.
- 13 Копко В.М. Теплоизоляция трубопроводов теплосетей: Учеб.-метод. пособие / В.М.Копко. – Минск: Тенхнопринт, 2002. – 160 с.
- 14 Ващишак І.Р. Розробка установки для дослідження підземних двотрубних теплових мереж з імітацією дефектів / І.Р. Ващишак // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Х.: Техніка, 2011. – Вип.101. – С. 199-207. – (Серія «Технічні науки і архітектура»).
- 15 Ващишак І.Р. Методика проведення досліджень технічного стану підземних теплових мереж на експериментальній установці / І.Р. Ващишак // “NDT days 2012”: Міжнарод. науч.-техн. конф., Созополь, Болгарія, 11-15 июня 2012 г.: труды конф. - Созополь, Болгарія, 2012. – С.273-276.
- 16 Бобик О.І. Теорія ймовірностей і математична статистика [навч. підручник] / О.І. Бобик, Г.І. Берегова, Б.І. Копитко. – Львів: ЛБІ НБУ, 2006. – 440 с.
- 17 Ващишак І.Р. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для контролю підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. – 2011. – №27. – С. 39-43.
- 18 Пат. 72203 Україна, МПК F17D 5/02. Пристрій для виявлення дефектів у трубопроводах підземних теплових мереж / заявники і патентовласники Ващишак І.Р., Ващишак С.П., Карпаш О.М., Райтер П.М., Яворський А.В. – u201201088; заявл. 02.02.2012; опуб. 10.08.2012. – 9 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
01.02.13

Рекомендована до друку
професором **Середюком О.Є.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Петришиним І.С.**
(ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»,
м. Івано-Франківськ)