УДК 624.014.042:519.1 DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2022.03.06

ПРОВЕДЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТРУБОПРОВОДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ З МЕТОЮ ДОСЯГНЕННЯ ЗАДАНОЇ НАДІЙНОСТІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В.М. Тороп

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: v.torop@gmail.com

Проаналізовано фактори, що впливають на надійність експлуатації теплових мереж під час проведення періодичних гідравлічних випробувань (опресування) підвищеним тиском. Виконано аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж м. Києва за 2002–2017 рр. та зазначено недоліки нормативних документів щодо процедури проведення періодичних гідравлічних випробувань підвищеним тиском. Розглянуто вплив дефектів та запропоновано підхід до призначення випробувального тиску опресування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводів з дефектами. Бібліогр. 14, рис. 4.

Ключові слова: теплові мережі, трубопроводи, гідравлічні випробування, руйнування, корозія, дефекти, надійність

Грамотна технічна політика щодо забезпечення надійної експлуатації трубопровідної системи теплових мереж полягає в тому, щоб мінімізувати кошти, що виділяються на підтримку надійності технічної системи на заданому рівні. Очевидно, що кошти, витрачені на підтримку надійності, не повинні перевищувати витрати, пов'язані з ліквідацією наслідків руйнування (аварії, відмови, пошкодження).

Трубопровідна система теплових мереж, як і будь-яка технічна система, схильна до руйнування. Серед можливих порушень нормальних умов експлуатації велика увага приділяється порушенню цілісності труби, оскільки наслідки можуть призвести до суттєвих економічних витрат. Як показали проведені дослідження [1–4], причиною найпоширеніших випадків втрати цілісності є проростання по товщині стінки зовнішньої корозії.

Стосовно трубопровідних мереж можливі три основні стратегії підтримки їхньої надійної експлуатації, які в різних поєднаннях можуть реально застосовуватися на практиці:

1. Усунення руйнувань (аварій, відмов, пошкоджень) у міру їх виникнення. Незважаючи на принципову відсутність профілактики руйнувань, це є, можливо, найефективнішою в економічному плані стратегією для відносно нових ділянок теплових мереж, що характеризуються високою надійністю, руйнування яких не призводить до надмірних економічних наслідків. Даною стратегією, незважаючи на тривалий час експлуатації теплових мереж, користується переважна більшість комунальних підприємств України.

2. Проведення моніторингових діагностичних робіт з виявлення різних докритичних дефектів та вжиття заходів щодо їх усунення. Ця стратегія відноситься до так званих превентивних стратегій. Вона є найпрогресивнішою, тим більше що методи моніторингу, діагностики, оцінки технічного стану та ремонту останнім часом досягли суттєвого прогресу. Однак без ретельного економічного аналізу та оптимізації обсягу, послідовності, періодичності, обґрунтування та проведення робіт вона може виявитися найзатратнішою. Крім того, специфіка прокладання трубопровідних мереж, їх розташування та конструктивні особливості виконання, використання різних матеріалів, діаметрів і товщин труб, наявність теплоізоляції, ділянок підтоплення, блукаючих струмів від довколишніх електрокабелів тощо часто ускладнює проведення діагностичних робіт, а отже й отримані дані не відповідають критеріям повноти та достовірності.

3. Проведення періодичних випробувань підвищеним тиском з метою одноразового виявлення та ремонту дефектів, які могли б у найближчому майбутньому призвести до руйнувань. Ця стратегія є найефективнішою для порівняно старих трубопроводів, де корозійні дефекти призводять до відносно частих порушень цілісності. Вона також використовується для демонстрації міцності та працездатності конструкцій, що навантажуються внутрішнім тиском, особливо при початковому пуску в експлуатацію або після тривалої перерви (простою).

Як зазначалося вище, немає найоптимальнішої, єдиної на всі випадки життя стратегії управління надійністю теплових мереж. Вибір конкретної стратегії можливий лише на обмежений період і виходячи як з ретельного аналізу поточного технічного стану, так і з економічної доцільності.

Мета цієї статті полягає в обговоренні переваг та недоліків третьої стратегії та пошуку підходу для призначення випробувального тиску опре-

Тороп В.М. – https://orcid.org/0000-0002-8807-9811
© В.М. Тороп, 2022

сування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводу з урахуванням економічної доцільності проведення гідростатичних випробувань (опресування) підвищеним тиском на міцність та герметичність (щільність).

Випробування підвищеним тиском мають два важливих значення: перше – підтвердження працездатності конструкції, друге – виявлення та ремонт дефектів, які можуть у період між випробуваннями призвести до аварій.

Проте існують певні обмеження для випробувань підвищеним тиском з метою підтвердження цілісності трубопроводу, які полягають у тому, що при прийнятому рівні тиску опресування може статися стільки руйнувань та що збитки від їх ремонту перевищуватимуть вигоду від безремонтної експлуатації протягом деякого визначеного періоду часу. З іншого боку, відсутність руйнувань ділянок трубопроводу в процесі випробувань свідчить про велику початкову (до випробувань) надійність трубопроводу. У цьому випадку випробування не призводять до поліпшення надійності, а можуть служити лише для демонстрації цілісності трубопроводу. Якщо при цьому існують ділянки, де швидкість розвитку початкових невеликих дефектів є суттєвою, проведення дорогих випробувань не є гарантією відсутності аварій (пошкоджень) у найближчому майбутньому.

Аналіз пошкодження трубопроводів теплових мереж м. Києва. За даними ПАТ «Київенерго» на 2016 р. експлуатувалося 2121,2 км магістральних (1237,5 км) та розподільчих (883,7 км) трубопроводів, виконаних у двотрубному виконанні (прямий та зворотний). При цьому термін експлуатації близько 70 % труб перевищував 30 років [1–3].

Поряд із широко використовуваними показниками надійності трубопроводів теплових мереж, таких як інтенсивність відмов (пошкоджень) та параметр потоку відмов [4], при зіставленні статистичних даних про пошкодження, виявлених на різних теплових мережах у різний час, важливою кількісною характеристикою може стати коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань, що визначається діленням числа пошкоджень, виявлених при проведенні гідравлічних випробувань, на число пошкоджень, виявлених при експлуатації за опалювальний сезон.

Для системи трубопроводів, які не мають пошкоджень (ідеальний варіант), цей коефіцієнт, як і самі гідравлічні випробування, не мають сенсу. Якщо пошкодження виявляються лише при гідравлічних випробуваннях, він дорівнює нескінченності. Природно, якщо пошкодження з тих чи інших причин неминуче, краще, щоб воно сталося під час проведення гідравлічних випробувань, оскільки наслідки для споживачів і трудовитрати на ремонтні роботи будуть мінімальними. Якщо пошкодження відбуваються як при гідравлічних випробуваннях, так і при експлуатації, цей коефіцієнт характеризує ефективність проведення гідравлічних випробувань. Тому для ефективної з точки зору проведення гідравлічних випробувань системи цей коефіцієнт повинен бути значно вищим за одиницю і прямувати до нескінченності.

З рис. 1 випливає, що коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань, що дорівнює відношенню кількості пошкоджень при проведенні гідравлічних випробувань до кількості пошкоджень, виявлених при експлуатації, нижче за 1 і має тенденцію, принаймні до 2013 р., до зниження. Статистичний аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж свідчить про суттєву зношеність трубопроводів та зниження ефективності періодичних гідравлічних випробувань.

Для підвищення ефективності експлуатації тепломереж ПАТ «Київтеплоенерго» за результатами проведених робіт [1–3] ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України пропонує виконати наступні роботи:

– розробити та впровадити експертну геоінформаційну систему «Міцність теплових мереж»

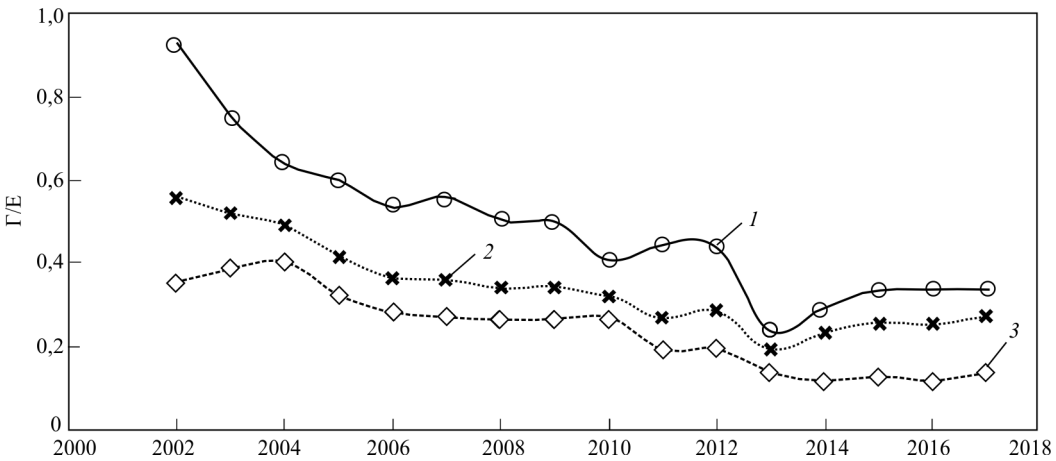

Рис. 1. Відношення кількості пошкоджень, виявлених при гідравлічних випробуваннях (Г) до кількості пошкоджень при експлуатації (Е) для магістральних (М) та розподільчих (Р) трубопроводів теплових мереж м. Києва за період від 2002 р. до 2017 р.: *1* – М; *2* – Р; *3* – М+Р

з метою фіксації та збору диференційованих даних щодо моніторингу пошкодження і старіння, оцінки технічного стану, прогнозу залишкового ресурсу, планування черговості та об'ємів проведення ремонтно-відновлювальних робіт для трубопроводів теплових мереж;

– розробити нову або переглянути існуючу нормативно-технічну документацію (НТД) [5–9], що регламентує існуючі процедури проведення гідравлічних випробувань і правила призначення випробувального тиску;

– оптимізувати розробку програм гідравлічних випробувань із використанням раціонального секціонування [10], з урахуванням даних про аварійність, реальні характеристики міцності та геометричні параметри і вартість ремонтно-відновлювальних робіт на основі впровадження сучасної геоінформаційної системи теплової мережі ПАТ «Київтеплоенерго»;

– оцінити вплив гідравлічних випробувань на властивості матеріалу трубопроводів теплових мереж;

– експериментально дослідити напружено-деформований стан під час експлуатації та гідравлічних випробувань для прийняття більш обґрунтованих рішень відносно призначення випробувального тиску опресування та верифікації результатів комп'ютерного моделювання.

У роботі [3] ми використали коефіцієнт ефективності проведення гідравлічних випробувань як відношення кількості пошкоджень, виявлених при гідравлічних випробуваннях (Г), до загальної кількості виявлених пошкоджень при експлуатації та опресуванні (Е+Г), що дозволило зіставити статистичні дані проведення гідравлічних випробувань тепломереж у м. Рига та ін.

Таким чином, практична користь від проведення опресування залежить від початкового технічного стану (надійності), що характеризується зокрема кількістю та розмірами наявних дефектів, характеристиками металу, а також від швидкості перебігу пошкоджуючих процесів (для трубопроводів теплових мереж характеристики металу погіршуються порівняно повільно, більш актуальним є зростання кількості новоутворених дефектів і швидкості розвитку наявних корозійних дефектів у місцях локальних деформацій). Слід зазначити відсутність у літературі як кількісних, так і якісних підходів з метою оцінки технічних переваг під час проведення опресування залежно від перелічених параметрів. У цій статті вперше пропонується підхід, що заснований на розробленій ймовірнісній методології ризик-аналізу [11, 12] до оцінки цілісності трубопроводів теплових мереж.

Однак спочатку розглянемо кількісні детерміністичні підходи, що описують руйнування трубопроводу з дефектом. Це важливо для розуміння того, які дефекти можуть залишитися після проведення опресування та яким є час їх розвитку до критичних розмірів за відомої швидкості їх підростання.

Вплив дефектів. Приймемо, що дефекти мають глибину a, довжину l (в осьовому поздовжньому напрямку) та ширину b (в окружному напрямку). Теоретичний аналіз показує, що ослаблення нетто-перетину дефекту (місце концентрації напружень) при дії кільцевих напружень пропорційне глибині дефекту і залежить від його безрозмірної довжини $\lambda = \sqrt{l^2 / Rt}$, де R і t – зовнішній радіус і товщина стінки труби. При дії поздовжнього напруження ослаблення нетто-перетину залежить також від глибини та безрозмірної ширини дефекту $\eta = b/(2\pi R)$. Враховуючи, що при рівних l і b безрозмірна довжина набагато більша за безрозмірну ширину, а окружні напруження в трубопроводі зазвичай значно перевищують поздовжні, далі ми розглядаємо руйнування від впливу окружного напруження, що виникає під впливом внутрішнього тиску.

На ділянках локальних корозійних ушкоджень оцінка статичної міцності може бути здійснена з використанням рекомендацій [13]. На рис. 2 представлено результати розрахунку тиску руйнування трубопроводу 630×8 мм зі сталі 17Г1С за наявності корозійного пошкодження (дефекту). Кожна з кривих відповідає пошкодженню певної глибини, вказаної на графіку.

Як випливає з рис. 2, пошкодження з глибиною менше за 7,6 мм, незалежно від їхньої протяжності, не викликають руйнування зворотного трубопроводу при робочому тиску P_p = 0,6 МПа. Дефект на зворотному трубопроводі, параметри якого перевищать критичні значення 7,8×300 мм,

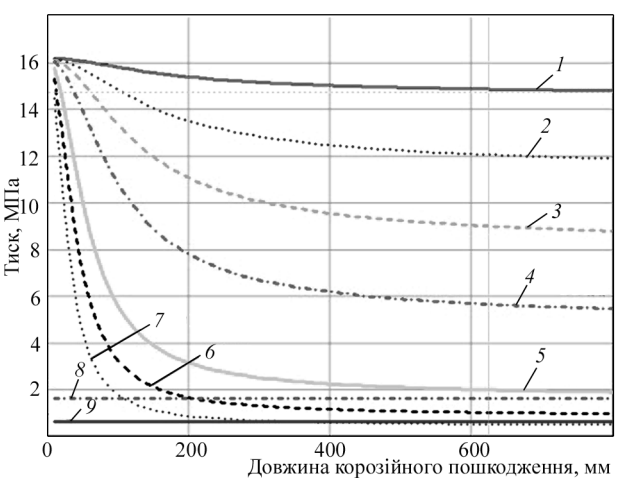

Рис. 2. Залежність руйнівного тиску від довжини та глибини корозійного пошкодження труби 630×8 мм зі сталі 17Г1С. Глибина пошкодження *a*: *1* – 0,8 мм; *2* – 2,4 мм; *3* – 4,0 мм; *4* – 5,6 мм; *5* – 7,2 мм; *6* – 7,6 мм; *7* – 7,8 мм; *8* – P_p = 1,6 МПа; 9 – P_p = 0,6 МПа

є неприпустимим, тобто спричинить руйнування. Для прямого трубопроводу з внутрішнім робочим тиском P_p = 1,6 МПа пошкодження з глибиною 7,2 мм не викликає руйнування незалежно від його протяжності. У цьому випадку найбільша довжина припустимого дефекту з глибиною 7,6 мм обмежена значенням 200 мм, а з глибиною 7,8 мм – довжиною 120 мм. Як бачимо, дефекти, розміри яких є припустимими для зворотного трубопроводу, є неприпустимими для прямого. При проведенні гідравлічних випробувань при $P_{ГВ}$ = 2,0 МПа критичними значеннями довжини при глибинах пошкоджень 7,2, 7,6 та 7,8 мм будуть значення 600, 160 та 100 мм відповідно. Таким чином, проведення гідравлічних випробувань створює певний «запас міцності», причому вищий у разі зворотного трубопроводу.

Рис. 3 ілюструє граничні криві стосовно тріщиноподібних дефектів для різних фіксованих значень їх безрозмірних глибин для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм і товщини стінки 7,92 мм зі сталі Х46). При зменшенні довжини дефекту 2*l* або його глибини *a* до нуля граничний тиск наближається до значення руйнівного тиску для бездефектної труби. На цьому ж рисунку наведено граничну криву для наскрізного тріщиноподібного дефекту (свищ), що розділяє діаграму на дві області, в одній з яких реалізується ситуація течі перед руйнуванням, а інша відповідає катастрофічному руйнуванню. Це означає, що поверхневий дефект, що проріс наскрізь, може перейти в нестабільний стан (руйнування), якщо точка на діаграмі, що характеризує його довжину та прикладений тиск, лежить вище граничної кривої для наскрізного дефекту. І навпаки, його довжина не збільшиться та буде гарантовано виконання умови концепції «теча перед руйнуванням», якщо відповідна точка лежить нижче за згадану криву.

Імовірнісний аналіз впливу опресування. Нехай *i*-ділянка трубопроводу характеризується деяким рівнем надійності n_i для максимально можливого внутрішнього тиску на цій ділянці. Як було показано в [14], надійність K_i майже однозначно залежить від кількості дефектів на цій ділянці (за умови, що вплив розкиду механічних властивостей металу та геометричних розмірів труби незначні) і від наявного статистичного розподілу розмірів дефектів. У цьому випадку ймовірність руйнування ділянки $f_i = (1 - n_i)$, а кількість очікуваних руйнувань N на всіх *i*-х ділянках трубопроводу є добутком f_i і K_i, тобто:

$$N = f_i \cdot K_i \qquad (1)$$

З часом збільшується як кількість дефектів, так і їх розміри. Для відносно малого проміжку часу дефекти, що знову утворилися, через обмежену швидкість їх розвитку не будуть впливати на надійність трубопроводу. Тому, задаючи швидкість розвитку дефектів, у першому наближенні можна визначити зміну надійності в часі. Будемо вважати, що середня швидкість розвитку в глибину наявних дефектів дорівнює 0,17 мм за рік і що дисперсія швидкості дорівнює 0,1 мм за рік (це означає, що швидкість корозії 0,27 за рік є достатньо ймовірною), а швидкості та дисперсії швидкості розвитку корозійних дефектів за довжиною та шириною в 10 разів вищі. У цьому випадку можна визначити надійність як функцію часу та максимального тиску. На рис. 4, *а* наведено графіки залежності надійності для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм та товщини стінки 7,92 мм зі сталі Х46) з прогресуючим корозійним дефектом від часу експлуатації для різних рівнів максимального робочого тиску.

Проведення випробувань підвищеним тиском призводить до того, що частина дефектів може зруйнуватися. Вважаючи відремонтовані місця абсолютно надійними, тим самим збільшуємо подальшу розрахункову надійність трубопроводу. Прирівняємо величину надійності при підвищеному тиску в даний час (без урахування підростання дефектів) до величини надійності при максимальному робочому тиску (з урахуванням розвитку корозійних дефектів у часі). Таким чином можна визначити залежність проміжку часу, протягом якого буде реалізовано «покращувальний час» – у результаті опресування буде виявлено та усунуто ті дефекти, які можуть призвести до руйнування у вказаний час. Графіки на рис. 4, *а* та 4, *б* ілюструють суть запропонованого підходу. Так, виконання опресування на рівні тиску в 12 МПа, що відповідає надійності 0,9974, і подальший ремонт дефектів, що «виявили» себе, дозволяє забезпечити вихідну надійність, що дорівнює 1. З іншого боку, поступове погіршення стану конструкції за рахунок корозійного пошкодження

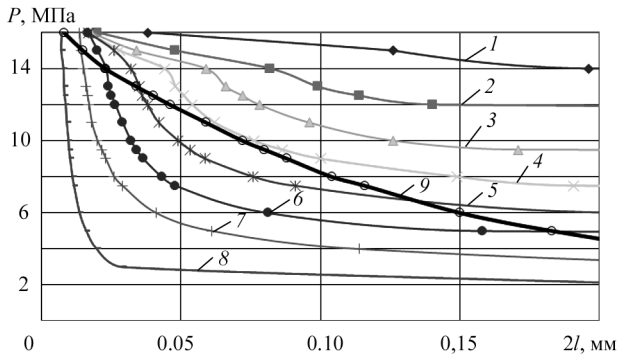

Рис 3. Залежності граничного внутрішнього тиску від граничної довжини дефекту для тріщиноподібних поверхневих напівеліптичних дефектів (з різними безрозмірними глибинами) та наскрізного дефекту (свищ): *1* – *a*/*t* = 0,2; *2* – 0,3; *3* – 0,4; *4* – 0,5; *5* – 0,6; *6* – 0,7; *7* – 0,8; *8* – 0,9; *9* – свищ

призведе до такої ж надійності 0,9974 тільки після закінчення експлуатаційного періоду в три роки при рівні максимального робочого тиску 6 МПа. Це означає, що дефекти, які мали б призвести до руйнування за ці три роки, будуть зруйновані в процесі опресування і таким чином протягом цього терміну буде досягнуто збільшення надійності трубопроводу.

Слід зазначити, що методологія ризик-аналізу заснована на ймовірнісних методах [11, 12], і тому проведення опресування не гарантує виключення локальних руйнувань протягом заданого терміну експлуатації. Так, для початкових дуже глибоких, але коротких дефектів проведення опресування може не призвести до виявлення дефекту, оскільки, як це випливає з рис. 2 і 3, залишкова міцність їх досить велика, у той час як при наявній швидкості росту поверхневих дефектів вони можуть стати наскрізними вже через невеликий час (порівняно з «покращуючим часом») після проведення опресування. Однак тут позитивним моментом є те, що короткі дефекти призводять до відмов типу локальної течі, а не типу повномасштабного (гільйотинного) руйнування.

Наведений підхід, суть якого складають суміщені діаграми на рис. 4, *а* і 4, *б*, розраховані для тестового трубопроводу (нормативні значення зовнішнього діаметра 355,6 мм та товщини стінки 7,92 мм зі сталі Х46), дозволяє вирішувати дві задачі:

– перша, розглянута нами вище, полягає у визначенні терміну безаварійної експлуатації після проведення опресування, якщо відомо значення максимального робочого тиску трубопроводу. За прийнятим тиском опресування з графіка на рис. 4, *б* визначається надійність. За відомою надійністю та максимальним робочим тиском з графіка на рис. 4, *а* визначається термін безаварійної експлуатації, що забезпечується проведенням даного гідровипробування;

– друга полягає у визначенні рівня випробувального тиску опресування для гарантування необхідного терміну безвідмовної роботи при заданому максимальному робочому тиску. Для цього на рис. 4, *а* вибирається необхідний термін безвідмовної експлуатації трубопроводу. Для вибраного терміну проводимо вертикальну лінію до перетину з кривою надійності заданого робочого тиску. Точка перетину вертикалі та кривої надійності визначає необхідну надійність. По ній з графіка на рис. 4, *б* легко визначити шуканий випробувальний тиск опресування.

Розроблений підхід може бути методологічною основою призначення випробувального тиску опресування. При цьому слід мати на увазі, що реальне підвищення надійності трубопроводу може досягатися тільки у випадках локальних руйнувань дефектних місць. Інакше випробування підвищеним тиском будуть лише дорогою демонстрацією цілісності трубопроводу. З іншого боку, запропонований підхід є ймовірнісним. Це означає, що руйнування в процесі випробувань можуть статися, якщо їхня ймовірність досить висока. При цьому ключовим параметром, що визначає доцільність проведення опресування, є очікуване число руйнувань у процесі випробувань, що визначається за формулою (1). Якщо це число дуже мале, то витрати на проведення опресування значно перевищуватимуть економічну вигоду від зменшення кількості руйнувань у процесі експлуатації. Математично вимога економічної доцільності проведення опресування записується як:

$$З_{оп} + П \cdot N_1 < З_{р1} \cdot N_1, \qquad (2)$$

де $З_{оп}$ – інтегральні витрати на проведення опресування, що включають не тільки прямі, але і непрямі витрати, пов'язані з простоєм і втраченою від цього вигодою; N_1 – кількість руйнувань на 1-й ділянці трубопроводу; П – вартість ремонту одного дефекту; $З_{р1}$ – прямі та опосередковані витрати, пов'язані з локальним руйнуванням та його ремонтом П, що включають як моральні витрати (наприклад, негативні публікації в пресі, зменшення суспільної довіри споживачів до експлуату-

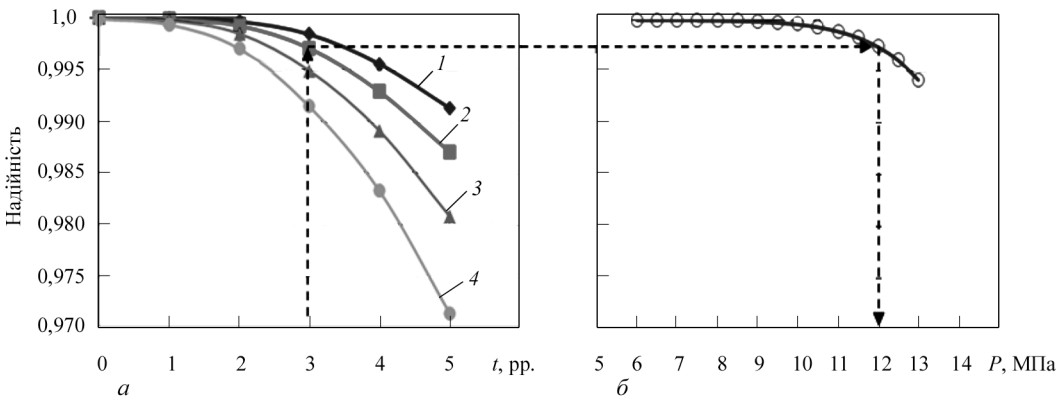

Рис. 4. Графіки зміни рівня надійності трубопроводу залежно від часу експлуатації за наявності корозійного дефекту (*а*) та зміни рівня надійності трубопроводу залежно від тиску опресування (*б*): *1* – *P* = 5; *2* – 6; *3* – 7; *4* – 8 МПа

ючої організації), так і витрати, пов'язані з відновленням екологічної ситуації. Розробка методології оцінки величин $З_{оп}$, $З_{р1}$ є необхідним завданням для розробки економічно ефективної методології проведення опресування. Як випливає з (2), така доцільність може мати місце, якщо число N_1 досить велике, що відповідно до (1) має місце, якщо ймовірність руйнування дефектної ділянки f_i і кількість наявних дефектів K_i досить великі.

Для вибору процедури опресування може виявитися корисним поняття питомих витрат ефективності, що дорівнює економії коштів від проведення гідравлічних випробувань, поділеної на кількість часу T, що «підвищує надійність» після проведення опресування:

$$Е = \frac{(З_{р1} - П) \cdot N_1 - З_{оп}}{T} \qquad (3)$$

Очевидно, що формально збільшення тиску опресування призводить до збільшення N_1, але при цьому збільшується час T, що «підвищує надійність». Зауважимо, що, як випливає з рис. 4, *а* і 4, *б*, N_1 збільшується набагато швидше, ніж T, тому формально з (3) випливає, що чим вищий тиск, тим ефективніше опресування. Насправді величина тиску обмежена «розумним» напруженням у металі трубопроводу, що не призводить до пошкодження металу, наприклад величиною, близькою до межі плинності. По-друге, максимальний час T також має обмеження, пов'язані з зародженням та розвитком нових дефектів, які не включені до вихідної статистики та врахування яких може в майбутньому істотно змінити прогнозовані параметри надійності.

Висновки

1. Виконано аналіз пошкоджень трубопроводів теплових мереж м. Києва за 2002–2017 рр. та наведено рекомендації щодо підвищення ефективності експлуатації тепломереж ПАТ «Київтеплоенерго».

2. Зазначено недоліки нормативних документів щодо процедури проведення періодичних гідравлічних випробувань підвищеним тиском та запропоновано підхід до призначення випробувального тиску опресування з метою досягнення заданої надійності експлуатації трубопроводів з дефектами.

3. Для обґрунтування економічної доцільності проведення гідравлічних випробувань запропоновано поняття питомих витрат ефективності, що дозволяє обґрунтувати прогнозовані параметри надійності експлуатації теплових мереж.

Список літератури

1. (2018) *Визначення впливу підвищеного тиску на властивості металу трубопроводів теплових мереж під час проведення гідравлічних випробувань з наданням рекомендацій щодо величини рівнів пробного тиску у залежності від умов експлуатації.* Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ.
2. (2020) *Дослідження причин руйнування ділянки магістрального теплопроводу діаметром 1020 мм з місця аварії по вул. Антоновича, 176.* Технічний звіт. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ.
3. Дмитриенко Р.И., Юхимец П.С., Тороп В.М. и др. (2020) Повреждаемость и эффективность проведения гидравлических испытаний тепловых сетей города Киева. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 37–44. DOI: https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04.
4. Чичерин С.В. (2022) *Совершенствование системы централизованного теплоснабжения при реконструкции и эксплуатации тепловых сетей:* Автореф. дис. …. канд. тех. наук. Омский государственный университет путей сообщения.
5. (2017) Інструкція №29 «*Проведення випробувань теплових мереж на гідравлічну щільність». Київ, ПАТ «Київенерго»*, СВП «Київські теплові мережі».
6. (2017) *Програма випробувань водяних тепломереж РТМ «Печерськ» СВП «КТМ» на гідравлічну щільність ТМ-1, 2, 8* від ТЕЦ-5 в 2017 р.
7. (2007) *Привила технічної експлуатації теплових установок і мереж.* Затв. 14.02.2007, № 71. Міністерство палива та енергетики України. Харків, Індустрія.
8. (2003) ГКД 34.20.507-2003 *«Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила».* Затв. 13.06.2003, № 296. Київ, Міністерство палива та енергетики України.
9. (1997) ГКД 34.20.504-94 *«Теплові мережі. Інструкція експлуатації».* Київ, НДІ Енергетики.
10. Муртазин И.И., Тимченко С.В. (2013) Опрессовки с колес. *Новости теплоснабжения*, **10**(158). http://www.ntsn.ru/10_2013.html
11. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопровідних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 1. Алгоритм побудови імовірнісної моделі. *Проблеми міцності*, **2**, 85–91.
12. Тороп В.М. (2005) Імовірнісний ризик-аналіз експлуатації трубопровідних систем, резервуарів та посудин тиску. Повідомлення 2. Метод оцінки функціональної придатності елементів конструкції за обмеженими статистичними даними. *Там само*, **3**, 96–103.
13. (2004) Recommended practice for corroded pipelines DNV-RP-F101.
14. Kiefner, J.F. (2001) *Role of hydrostatic testing in pipeline integrity assessment.* Northeast Pipeline Integrity Workshop, Albany, New York, June 12.

References

1. (2018) *Determination of high pressure influence on metal properties in heating system pipelines during hydraulic tests with provision of recommendations concerning the value of test pressure levels depending on service conditions.* In: Technical report. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
2. (2020) *Investigation of causes of fracture in a section of main hot water system of 1020 mm diameter from the accident site at 176 Antonovych Str.*
3. Dmytrienko, R.I., Yukhymets, P.S., Torop, V.M. et al. (2020) Damageability and effectiveness of conducting hydraulic testing of heating systems of Kyiv city. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 37–44. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04 [in Ukrainian].
4. Chicherin, S.V. (2022) Improvement of centralized heating system at reconstruction and operation of heating networks. *In: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*, OSTU [in Russian].
5. (2017) *Instruction No. 29: Testing of heating systems for hydraulic density.* Kyiv, PAT Kyivenergo, SVP Kyiv heating networks [in Ukrainian].
6. (2017) *Program of hydraulic density testing of water supply systems TM-1, 2, 8 of RTM Pechersk of SVP KTM from HPP-5 in 2017.*
7. (2007) *Rules of technical operation of heat plants and networks.* Appr. 14.02.2007, № 71. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Kharkiv, Industriya [in Ukrainian].

8. (2003) *GKD 34.20.507-2003: Technical operation of electric power plants and heating systems. Rules.* Approv. 13.06.2003, № 296. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukrainian].
9. (1997) *GKD 34.20.504-94: Heating systems. Operating instructions.* Kyiv, Research Institute of Energy [in Ukrainian].
10. Murtazin, I.I., Timchenko, S.V. (2013) Pressure tests using vehicles. *Novosti Teplosnabzheniya*, **10**(158) [in Russian]. http://www.ntsn.ru/10_2013.html
11. Torop, V.M. (2005) Probabilistic risk-analysis of operation of pipeline systems, tanks and pressure vessels. Information 1: Algorithm for construction of the probabilistic model. *Problemy Mitsnosti*, **2**, 85–91 [in Ukrainian].
12. Torop, V.M. (2005) Probabilistic risk-analysis of operation of pipeline systems, tanks and pressure vessels. Information 2: Method of evaluation of fitness-for-purpose of structural elements using limited data. *Ibid.*, **3**, 96–103 [in Ukrainian].
13. (2004) *Recommended practice for corroded pipelines DNV-RP-F101.*
14. Kiefner, J.F. (2001) *Role of hydrostatic testing in pipeline integrity assessment.* Northeast Pipeline Integrity Workshop, Albany, New York, June 12.

PERFORMANCE OF HYDRAULIC TESTING OF PIPING OF HEAT NETWORKS TO ACHIEVE THE SPECIFIED RELIABILITY OF THEIR OPERATION

V.M. Torop

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: v.torop@gmail.com

Factors affecting the operational reliability of heat networks during periodical hydraulic testing (pressure testing) by higher pressure. Analysis of damage of Kiev heat network piping during 2002 – 2017 has been performed and deficiencies of normative documents have been noted as regards the procedure of performance of periodical hydraulic testing by higher pressure. Influence of defects has been considered and an approach has been proposed for determination of testing pressure, in order to achieve the specified reliability of operation of pipelines with defects. Ref. 14, Fig. 4.

Keywords: heat networks, piping, hydraulic testing, fracture, corrosion, defects, reliability

Надійшла до редакції 12.07.2022

КОНФЕРЕНЦІЇ, ВИСТАВКИ, СЕМІНАРИ

Назва заходу	Дата	Організатор, місце проведення
Image-Based Simulation for Industry (IBSim-4i 2022)	17.10.–20.10.2022	Swansea University, London, United Kingdom
International Conference on NDE 4.0	24.10.–27.10.2022	DGZfP, Berlin, Germany
Singapore International NDT Conference & Exhibition NDT for Sustainability New Energy, NDT for Additive Manufacturing, NDE 4.0, Qualification & Certificaiton, NDT for LNG, Fuel Distribution, NDT for Marine & Offshore, NDT for Construction & Civil Engineering, NDT for Aerospace	07.11.–08.11.2022	NDTSS, Singapore
52nd NDE for Safety 2022 / Defektoskopie 2022	08.11.–10.11.2022	Czech Society for NDT, Přerov, Czech Republic
Міжнародна науково-технічна конференція «Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій»	10.11.–11.11.2022	Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна
XVI Міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (Корозія-2022)	15.11.–16.11.2022	ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна
XXI Міжнародний промисловий форум	15.11.–18.11.2022	ТОВ «Міжнародний виставковий центр» Київ, Україна
Конференція «Зварювання та неруйнівний контроль для відновлення національної економіки»	17.11.2022	Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, Україна
4th International Seminar «New trends in the construction, research and operation of flying objects»	17.11.–18.11.2022	Lukasiewicz Institute of Aviation, Warszawa, Poland
APCNDT 16th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing	28.02.–03.03.2023	AINDT, Melbourne, Australia
InCeight Casting C8	06.03.–08.03.2023	Fraunhofer LBF, Darmstadt, Germany
8th Middle East NDT Conference & Exhibition	12.03.–15.03.2023	Saudi Arabian Section of ASNT, Bahrain Society of Engineers, Manama, Bahrain
The 8th International Workshop on Reliability of NDT/NDE (8th IWRndt)	12.03.–16.03.2023	ICNDT/SPIE, Long Beach, CA, USA
7. Fachseminar Sichtprüfung – aktuelle Trends und Entwicklungen	14.03.–15.03.2023	DGZfP, Leipzig, Germany
ECNDT 2023 European Conference on Non-Destructive Testing	03.07.–07.07.2023	FSEND-RELACRE, Lisbon, Portugal
20th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2020)	27.05.–31.05.2024	KSNT, Incheon, Korea