

Досліджено причини відмов та значення питомого параметра потоку відмов металевих водопровідних труб. Аналіз статистичних даних щодо відмов дозволив побудувати залежності питомого параметра потоку відмов від діаметра трубопровода. Виконано порівняльний аналіз отриманих даних та розроблені відповідні висновки та пропозиції. Отримані дані корисні для розрахунків надійності систем водопостачання

Ключеві слова: водопостачання, водопровідні мережі, металеві труби, надійність, безвідмовність, причини відмов труб

Исследованы причины отказов и значения удельного параметра потока отказов металлических водопроводных труб. Анализ статистических данных об отказах позволил построить зависимости удельного параметра потока отказов от диаметра трубопровода. Выполнен сравнительный анализ полученных данных и разработаны соответствующие выводы и предложения. Полученные данные полезны для расчетов надежности систем водоснабжения

Ключевые слова: водоснабжения, водопроводные сети, металлические трубы, надежность, безотказность, причины отказов труб

УДК 628.14
DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101262

ОЦІНЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ВОДОПРОВІДНИХ ТРУБ

О. В. Матяш

Кандидат технічних наук*

І. С. Усенко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: irina__usenko@ukr.net

Р. С. Мягкохліб

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики**

E-mail: myagkohlib@gmail.com

С. О. Костенко

Асистент*

*Кафедра гідравліки, водопостачання

та водовідведення**

**Полтавський національний технічний

університет імені Юрія Кондратюка

пр. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011

1. Вступ

Водопровідні мережі – це найбільш протяжний елемент системи водопостачання, а тому найбільш вразливий за надійністю. Аварії на водопровідних мережах призводять до багатьох негативних наслідків як для комунальних служб, так і для споживачів води. З одного боку, пошкодження ділянок на діючих водопровідних мережах призводять до втрат цінного ресурсу – води та додаткових фінансових затрат на ліквідацію аварій. З іншого боку, це викликає невдоволення населення через недоотримання води в потрібній кількості для своєчасного задоволення своїх потреб. Не менше проблем виникає і на промислових підприємствах, коли перерва в подаванні води призводить до збитків через недовипуск продукції. Зважаючи на це, споживачі води, як юридичні, так і фізичні особи, завжди висувають вимоги щодо надійності водопостачання. Ці вимоги можуть бути сформульовані по-різному, але на сьогодні неможливо виконати порівняння вказаних вимог з нормативними показниками надійності систем водопостачання. Так, ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі і споруди» [1] формулює тільки вимоги щодо тривалості перерв у водопостачанні (табл. 1) і не вказує на частоту таких перерв.

У той же час, згідно з постановою Кабінету міністрів України [2], встановлено, що: відсутність води у споживачів повинно бути не більше 6-ти годин на добу та не часті-

ше 2-х разів на місяць. Дана постанова носить узагальнений характер та не вказує, для яких споживачів (окремої людини чи населеного пункту) ці вимоги. Зазначені вище аспекти обмежують напрацювання заходів щодо підвищення надійності системи водопостачання в цілому.

Таблиця 1

Категорії централізованих систем водопостачання по надійності дії або за ступенем забезпеченості подачі води

Категорія централізованих систем водопостачання	Умови функціонування систем по допустимих границях		
	Зниження подачі води		Перерва подачі води
	%	час	
1	<30	<3 діб	Допускається на час виключення пошкоджених та включення резервних елементів системи <10 хв
2	<30	<10 доби	Допускається на час виключення пошкоджених та включення резервних елементів системи та проведення ремонту <6 год
3	<30	<15 діб	Допускається на час виключення пошкоджених та включення резервних елементів системи та проведення ремонту <24 год

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогоднішній день питання надійності окремих споруд водопровідного комплексу досить гостро стоїть як перед науковцями, так і перед фахівцями у галузі водопостачання. Цей фактор є важливим тому, що напругу пов'язаний із ефективністю та якістю надання послуг з водопостачання споживачам.

Розробленню методів та методологій розрахунку надійності присвячена значна кількість наукових праць. Для систем водопостачання запропоновано визначати рівень їх надійності за коефіцієнтами готовності K_T або безвідмовної роботи $K_{БР}$ [3]. Проте, для визначення коефіцієнта готовності потрібно знати ще й середню тривалість ліквідації відмови (середню тривалість ремонту). В [4] запропоновано більш досконалу ніж в ДБН В 2.5-74:2013 класифікацію споживачів і систем водопостачання за надійністю (табл. 2), яка встановлює нормативні вимоги щодо надійності водопостачання як технологічного процесу. Розроблені методики [3, 4] для розрахунку надійності споруд систем водопостачання дозволяють розраховувати кількісні показники надійності. Це, в свою чергу, дає можливість порівняти їх з нормативними вимогами. З іншої сторони, потрібно продовжувати розробляти методи та методики розрахунку надійності водопровідних споруд з урахуванням указаних вимог. Розрахунки надійності окремих елементів систем водопостачання в [5, 6] виконані лише на основі теоретичних засад. Розроблена методика розрахунку надійності в [7] лише може використовуватися для систем водопостачання з мережами розгалуженого типу. Для отримання реальної картини надійності металевих водопровідних труб слід проводити дослідження для кожного міста додатково [8].

Значна увага науковців прикута до збирання та аналізу статистичних даних щодо аварій на водопровідних мережах. Встановлено [9, 10] причини відмов водопровідних труб та основних факторів впливу на надійність окремих споруд системи водопостачання м. Москва (Росія) та м. Вавілон (Ірак). На основі зібраних статистичних даних виконано аналіз відмов трубопроводів залежно від діаметрів і матеріалу труб (рис. 1).

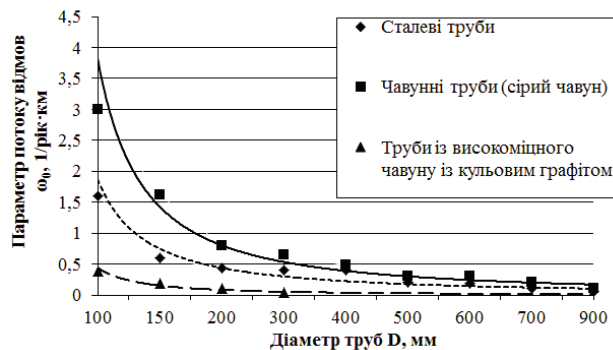


Рис. 1. Залежність питомого параметра потоку відмов від діаметра труб

Проте використання цих результатів з надійності водопровідних труб для інших міст складно. Для отримання достовірних результатів з надійності в інших населених пунктах є ряд місцевих факторів: корозійність води, якість експлуатації водопровідних мереж, геологічні умови та інші.

Актуальним є питання моделювання відмов споруд систем водопостачання залежно від багатьох впливів: періоду експлуатації, зміни тисків у водопровідній мережі, технічного обслуговування систем, людського фактору та інші. В роботах науковців [11, 12] представлено аналізи та методи, котрі дозволяють встановити причинно-наслідковий зв'язок подій відмов у вигляді «матричного дерева відмов». Оцінювання надійності системи водопостачання, як відновлювальної технічної системи, дозволило побудувати статистичні моделі інтенсивності відмов з урахуванням часу та графічно відобразити у вигляді кривої надійності [13]. Будь-яке теоретичне дослідження [11–13] повинно бути перевірене практичним експериментом. Для цього слід аналізувати види відмов окремих споруд системи водопостачання. В [14] проведений детальний аналіз відмов металевих труб під впливом корозії. Проте практика експлуатації трубопроводів показує, що причиною відмов трубопроводів може слугувати ряд інших причин.

Теоретичні методики розрахунку надійності спираються на існуючі математичні моделі процесу функціонування відновлювальних елементів.

Проте, для підтвердження теоретичних гіпотез щодо відмов і відновлень окремих елементів потрібні статистичні дані з практики експлуатації. Практичні методики базуються на статистичних даних з надійності елементів, що отримані при експлуатації. Тому, чим більше статистичних даних з експлуатації тим точнішими будуть результати розрахунків надійності водопровідних споруд.

Таблиця 2

Класифікація споживачів і систем водопостачання за надійністю

№ з/п	Групи та категорії систем водопостачання	Значення основних та базових показників надійності		
1	Перша група Підгрупа А – системи водопостачання небезпечних виробництв	Максимум імовірності безвідмовної роботи протягом терміну служби $\max P(T_{сл})$		
	Підгрупа Б – протипожежні системи водопостачання	Максимум коефіцієнта оперативної готовності за 3 години локалізації пожежі $\max K_{ог} = K_T \cdot P(\tau)$		
2	Друга група Централізовані водопроводи населених пунктів при кількості жителів	Напрацювання на відмову T , год	Середній час відновлення працездатності T_B , год	Коефіцієнт готовності K_T
	1 категорія міста $N \geq 50$ тис. жителів	$T \geq 2160$ год (3 місяця)	$T_B \leq 3$ год	0,99861
	2 категорія міста $10 \text{ тис.} \leq N \leq 50$ тис. жителів	$T \geq 360$ год (0,5 місяця)	$T_B \leq 6$ год	0,98361
	3 категорія смт та села $N < 10$ тис. жителів	$T \geq 360$ год (0,5 місяця)	$T_B \leq 24$ год	0,93750

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є оцінювання надійності водопровідних труб на прикладі системи водопостачання міста Кременчук Полтавської області (Україна).

Для досягнення вказаної мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- визначити основні фактори, які призводять до відмов металевих водопровідних труб (якісний аналіз);
- розрахувати основні показники безвідмовності металевих водопровідних труб (кількісний аналіз);
- визначити залежності параметра потоку відмов від діаметра труб на основі статистичних даних щодо пошкоджень металевих труб.

4. Матеріали та методи дослідження безвідмовності металевих водопровідних труб

4.1. Матеріали та методи дослідження відмов металевих водопровідних труб

Для виконання досліджень з оцінювання безвідмовності металевих водопровідних труб використано інформацію щодо пошкоджень водопровідних мереж об'єкта дослідження. У місцевому «Водоканалі» відомості щодо відмов елементів систем водопостачання реєструються у кінці кожного дня майстрами відповідних ділянок та заносяться в єдину електронну базу. Для оцінювання безвідмовності труб ділянок водопровідних мереж були зібрані та оброблені статистичні дані м. Кременчук Полтавської області (Україна). Використано дані щодо пошкоджень для металевих труб діаметром 50...300 мм протягом 7 років. Перед об'єднанням статистичних даних у генеральну вибірку виконано перевірку окремих виборок на відхилення від прийнятого закону розподілу результатів спостереження.

Для опрацювання та аналізу отриманих статистичних даних відмов металевих водопровідних труб використані наступні методи:

- математична статистика при аналізі статистичних даних щодо пошкоджень металевих труб;
- теорія надійності при виконанні якісного та кількісного аналізу безвідмовності водопровідних мереж.

4.2. Аналіз статистичних даних щодо відмов металевих водопровідних труб

4.2.1. Плани випробувань

В теорії надійності [15], при виборі можливих планів випробувань беруть до уваги кількість елементів (N), котрі проходять випробування, час випробування (t) та характер випробування:

- випробування з відновленням (В) – це випробування, в якому кожен елемент, що відмовив, замінюється новим;
- випробування без відновлення (Б) – це випробування, в якому елемент, що відмовив під час дослідження, не замінюється.

Моменти завершення випробувань можуть бути задані різними способами:

- T – плани, при яких випробування проводяться протягом заданого часу T;
- г – плани, при яких випробування проводяться до моменту появи г-ої відмови;
- (г, T) – плани, при яких випробування проводяться або до моменту t_r появи г-ої відмови, якщо $t_r < T$, або до моменту T, якщо $t_r > T$;

1. [N, B, T] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, відновлюються (В); випробування проводиться до раніше визначеного моменту часу T.

2. [N, B, г] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, відновлюються (В); випробування проводиться до моменту появи г-ої відмови.

3. [N, B, (T, г)] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, відновлюються (В); випробування проводяться або до моменту t_r появи г-ої відмови, якщо $t_r < T$, або до моменту T, якщо $t_r > T$.

4. [N, Б, T] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, не відновлюються (Б); випробування проводиться до визначеного моменту часу T.

5. [N, Б, г] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, не відновлюються (Б); випробування проводиться до моменту появи г-ої відмови.

6. [N, Б, (T, г)] – план, при якому на випробування ставляться N елементів; елементи, які відмовили, не відновлюються (Б); випробування проводяться або до моменту t_r появи г-ої відмови, якщо $t_r < T$, або до моменту T, якщо $t_r > T$.

Водопровідні труби відносяться до відновлювальних елементів, а час спостереження для одержання статистичних даних склав 7 років. Зважаючи на вищесказане прийнято перший план випробувань [N, B, T].

4.2.2. Загальна характеристика статистичних даних

Загальнені статистичні дані щодо пошкоджень металевих водопровідних труб наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Загальні статистичні дані щодо пошкоджень металевих водопровідних труб м. Кременчук Полтавської області (Україна)

Труби ділянок мережі	Діаметр D, мм	Загальна довжина труб, які проаналізовано, L, км	Кількість зафіксованих пошкоджень на ділянках мережі, n
Чавунні (сірий чавун)	50	0,400	15
	100	14,490	398
	150	12,110	234
	200	9,920	174
	250	11,095	96
	300	12,760	98
	Всього	60,775	1015
Сталеві	50	1,0500	40
	100	9,979	177
	150	4,3900	64
	200	1,1410	14
	250	5,5000	57
	300	6,6800	63
	Всього	28,74	415

Дослідження відмов на водопровідних мережах об'єкта дослідження показали, що на загальній протяжності чавунних трубопроводів 60,775 км кількість відмов склало 1015, а на сталевих трубопроводах протяжністю 28,74 км – 415.

5. Результати досліджень безвідмовності металевих водопровідних труб

5.1. Якісний аналіз пошкоджень труб

Аналіз статистичних даних дозволив виділити основні види пошкоджень для металевих водопровідних труб (рис. 2). Для чавунних труб:

- вихід цементу з розтрубних з'єднань – 68 %;
- поперечні переломи – 19 %;
- корозія – 9 %;
- пошкодження землерийною технікою – 4 %.

Для сталевих труб:

- наскрізні свищі – 71 %;
- порушення зварних з'єднань – 18 %;
- корозія – 7 %;
- пошкодження землерийною технікою – 4 %.

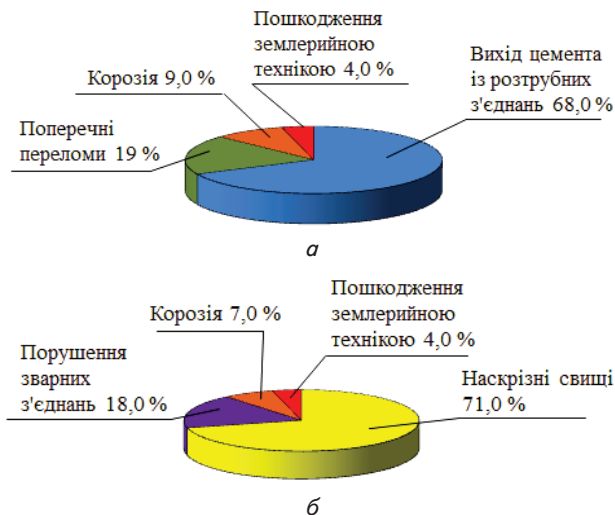


Рис. 2. Види пошкоджень металевих водопровідних труб м. Кременчук (Україна): а – чавунні труби (сірий чавун); б – сталеві труби

Для чавунних труб найбільшим видом пошкоджень є вихід цементу із розтрубних з'єднань (68 %). Для сталевих трубопроводів найбільшим фактором відмов становлять наскрізні свищі (71 %).

5.2. Кількісний аналіз пошкоджень труб

В якості основного показника безвідмовності металевих водопровідних труб прийнято середнє напрацювання на відмову T та обернену йому величину – середнє значення параметра потоку відмов ω . Для розрахунків безвідмовності ділянок водопровідної мережі потрібно використовувати питомий параметр потоку відмов ω_0 – це параметр потоку відмов, який віднесений до 1 км трубопроводу. Для розрахунку середнього значення питомого параметра потоку відмов ω_0 використана формула:

$$\omega_0 = \frac{n}{t \cdot \sum L}, \quad (1)$$

де n – кількість відмов ділянки водопровідної мережі; t – термін спостереження; $\sum L$ – сумарна довжина ділянок водопровідної мережі відповідного діаметра, км.

Фахівцями з водопостачання [4, 8] прийнята статистична гіпотеза експоненціального розподілу напрацювання на відмову T 1 км трубопроводу. Аналіз статистичних даних системи водопостачання об'єкта дослідження проводився протягом фіксованого часу, а отримані значення питомого параметра потоку відмов ω_0 були випадковими. Інтервальні оцінки для питомого параметра потоку відмов обчислені за наступними формулами:

$$\omega_0^{\text{н}} = \frac{\omega_0}{\gamma_1}; \quad (2)$$

– верхня інтервальна оцінка параметра потоку відмов:

$$\omega_0^{\text{в}} = \frac{\omega_0}{\gamma_2}, \quad (3)$$

де γ_1, γ_2 – коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок у випадку експоненціального розподілу, які прийняті згідно з [16] для довірчої ймовірності $\gamma = 0,95$.

Результати розрахунків наведені в табл. 4.

Середньозважене значення питомого параметра потоку відмов ω_0 незалежно від діаметра обчислено за формулою:

$$\omega_0^{\text{mid}} = \frac{\omega_{01}L_1 + \omega_{02}L_2 + \dots + \omega_{0n}L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}. \quad (4)$$

Середньозважене значення питомого параметра потоку відмов ω_0 незалежно від діаметра для системи водопостачання об'єкта дослідження складає:

$$\omega_0^{\text{mid}} = 2,98 \text{ 1/рік} \cdot \text{км} \text{ – для чавунних труб};$$

$$\omega_0^{\text{mid}} = 2,06 \text{ 1/рік} \cdot \text{км} \text{ – для сталевих труб}.$$

Таблиця 4

Розрахунок інтервальних оцінок для питомого параметра потоку відмов ω_0

Труби ділянок мережі	Діаметр D , мм	Об'єм виборки n	Довірча ймовірність γ	Коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок		Питомий параметр потоку відмов ω_0 , 1/рік·км		
				нижня γ_1	верхня γ_2	середнє значення	інтервальна оцінка	
							нижня	верхня
Чавунні (сірий чавун)	50	15	0,95	1,4	0,74	5,36	3,83	7,24
	100	398		1,09	0,918	3,92	3,60	4,27
	150	234		1,15	0,87	2,76	2,40	3,17
	200	174		1,19	0,85	2,51	2,11	2,95
	250	96		1,23	0,822	1,24	1,00	1,50
	300	98		1,225	0,824	1,10	0,90	1,33
Сталеві	50	40	0,95	1,33	0,755	5,44	4,09	7,21
	100	177		1,16	0,868	2,53	2,18	2,92
	150	64		1,28	0,79	2,08	1,63	2,64
	200	14		1,4	0,74	1,75	1,25	2,37
	250	57		1,32	0,77	1,48	1,12	1,92
	300	63		1,4	0,738	1,35	0,96	1,83

5.3. Аналітичні залежності для безвідмовності металевих труб

Як показав аналіз статистичних даних (табл. 4), питомий параметр потоку відмов металевих труб зменшується із збільшенням діаметра. Це дало можливість оцінити та спрогнозувати рівень надійності металевих водопровідних труб залежно від діаметра.

У результаті математичної обробки статистичних даних отримано залежності питомого параметра потоку відмов ω_0 від діаметра труб. Побудова функцій на основі статистичних даних виконана за допомогою електронних таблиць «Microsoft Excel SR-1».

Графіки залежностей питомого параметра потоку відмов ω_0 від діаметра труб приведені на рис. 3, 4.

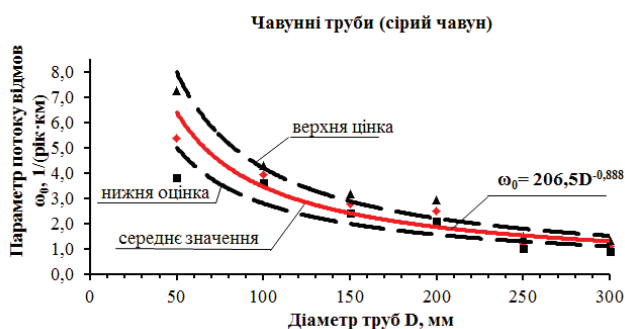


Рис. 3. Аналітична залежність $\omega_0 = f(D)$ для чавунних труб

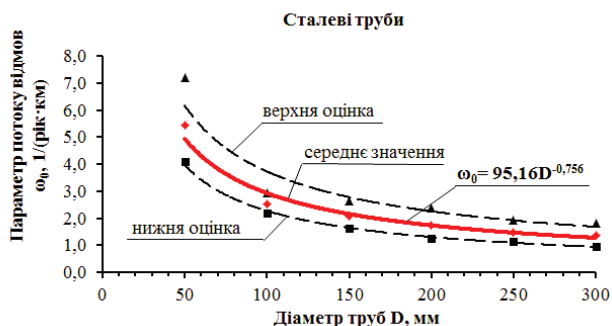


Рис. 4. Аналітична залежність $\omega_0 = f(D)$ для сталевих труб

Отримані аналітичні функції для середніх значень питомого параметра потоку відмов ω_0^{mid} для мережі водопостачання об'єкта дослідження мають вигляд:

- для чавунних труб $\omega_0^{mid} = 206,5D^{-0,888}$;
- для сталевих труб $\omega_0^{mid} = 95,16D^{-0,756}$,

де D – діаметр труб в мм.

6. Обговорення результатів дослідження безвідмовності металевих водопровідних труб

6.1. Порівняльний аналіз причин пошкодження водопровідних труб

Визначення основних факторів відмов водопровідних металевих труб це актуальний напрямок досліджень надійності на теренах України. Стан водопровідних трубопроводів має високий відсоток зношення (більше 90 %) та низькі темпи оновлення водопровідних мереж.

Основні причини відмов металевих труб водопровідних мереж (рис. 2) дозволили встановити, що домінуючими факторами є:

- для чавунних (сірий чавун) труб – поперечні переломи та вихід цементу із розтрубних з'єднань;
- для сталевих труб – наскрізні свищі та пошкодження зварних з'єднань.

Отримані результати причин відмов чавунних та сталевих водопровідних труб не розходяться із даними робіт відомих закордонних авторів [17, 18]. Згідно з [17, 18], на базі статистичних даних аварій п'яти водопровідних господарств встановлено фізичні та екологічні чинники, які призводять до відмов на водопровідних мережах. Аналіз основних пошкоджень дозволив класифікувати та виділити основні види пошкоджень, які аналогічні дослідженням в Україні:

- для чавунних труб (сірий чавун): повздовжня тріщина та точкова корозія;
- для сталевих труб: наскрізні свищі.

У результаті кількісного аналізу статистичних даних відмов водопровідних металевих труб отримані числові значення та інтервальні оцінки для питомого параметра потоку відмов в діапазоні діаметрів D=50...300. Також отримані середньозважені значення параметра потоку відмов ω_0 незалежно від діаметра для системи водопостачання м. Кременчук за формулою (4). Аналіз опублікованих досліджень інших авторів [9, 19] дозволив виконати порівняння безвідмовності водопровідних труб за питомим параметром потоку відмов ω_0 . Порівняння представлено діаграмами (рис. 5), які показують суттєву різницю безвідмовності труб у різних країнах. Порівняння з [9, 19] показує, що безвідмовність українських металевих водопровідних труб значно нижче ніж у Швеції та Німеччині та приблизно у 2 рази нижче ніж у Польщі.

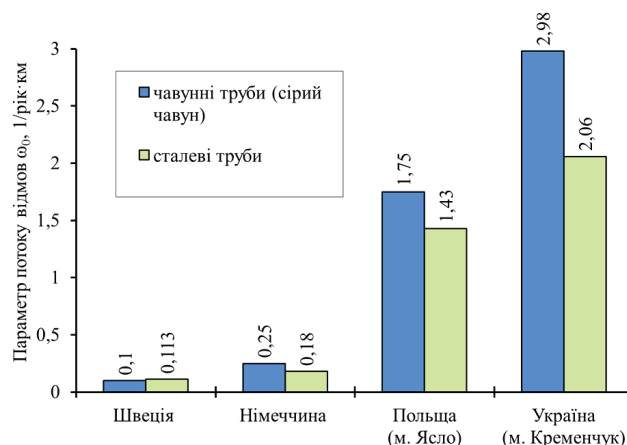


Рис. 5. Порівняння безвідмовності труб за параметром потоку відмов

Аналіз статистичних даних відмов дозволив побудувати залежності $\omega_0 = f(D)$ та в подальшому прогнозувати безвідмовність водопровідних мереж для інших сортментів металевих труб. На рис. 6, 7 наведено графіки аналітичних залежностей для м. Кременчук (Україна) та інших закордонних міст з інших країн [9, 10]. Отримані залежності підтвердили відомий факт, що із збільшенням діаметра металевих труб питомий параметр потоку відмов зменшується. Проте аналітичні залежності мають різний вигляд для вказаних міст. Це може бути

викликано або недостатньою точністю реєстрації пошкоджень, або існують місцеві фактори експлуатації, які різні у вказаних містах (тиски у трубах мережі, ґрунти, гідро-геологічні умови і т. ін.).

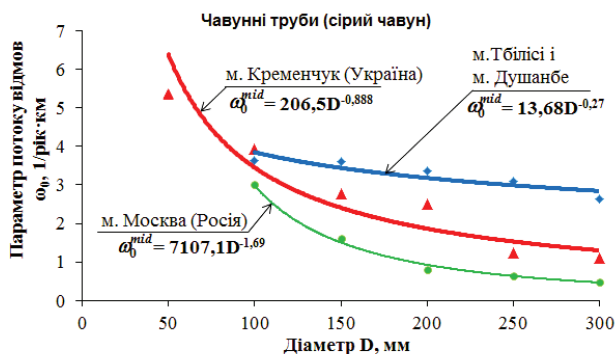


Рис. 6. Аналітичні залежності $\omega_0 = f(D)$ для чавунних труб

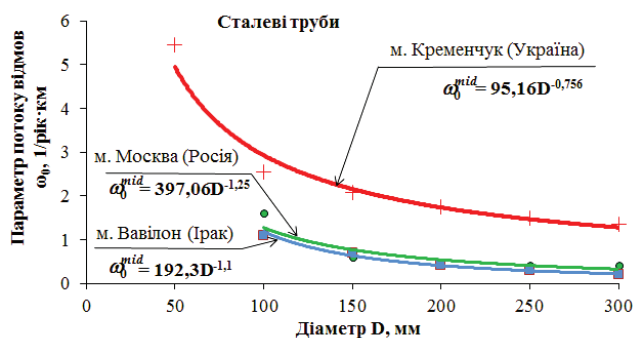


Рис. 7. Аналітичні залежності $\omega_0 = f(D)$ для сталевих труб

Отримані залежності питомого параметра потоку відмов від діаметра труб (рис. 6, 7) дозволяють достатньо просто виконати розрахунки надійності трубопроводів для інших сортментів діаметрів труб.

7. Висновки

1. Аналіз методами математичної статистики даних експлуатації щодо відмов металевих водопровідних труб м. Кременчук Полтавської області (Україна) підтвердив той факт, що із збільшенням діаметра металевих труб питомий параметр потоку відмов зменшується.

2. Проведений статистичний аналіз дозволив виділити основні види пошкоджень для металевих водопровідних труб. Для чавунних труб:

- вихід цементу з розтрубів – 68 %;
- поперечні переломи – 19 %;
- корозія – 9 %;
- пошкодження землерийною технікою – 4 %.

Для сталевих труб:

- наскрізні свищі – 71 %;
- порушення зварних з'єднань – 18 %;
- корозія – 7 %;
- пошкодження землерийною технікою – 4 %.

3. Отримані аналітичні залежності для середнього значення питомого параметра потоку відмов металевих труб мають наступний вигляд:

- чавунні труби (сірий чавун) $\omega_0^{\text{mid}} = 206,5D^{-0,888}$ 1/рік-км;
- сталеві труби $\omega_0^{\text{mid}} = 95,16D^{-0,756}$ 1/рік-км,

де D – діаметр труб в мм.

Отримані залежності дозволяють обчислювати частоту відмов ділянок мережі $D = 50 \dots 300$.

4. Узагальнені середні значення питомого параметра потоку відмов ω_0^{mid} незалежно від діаметра для м. Кременчук Полтавської області (Україна) складають:

- для чавунних труб (сірий чавун) $\omega_0^{\text{mid}} = 2,98$ 1/рік-км;
- для сталевих труб $\omega_0^{\text{mid}} = 2,06$ 1/рік-км.

5. Виконане порівняння з зарубіжними даними показує, що безвідмовність українських металевих водопровідних труб (чавунні труби – 2,98 1/рік-км, сталеві труби – 2,06 1/рік-км) значно менша ніж у країнах Західної Європи: Польща (чавунні труби – 1,75 1/рік-км, сталеві труби – 1,43 1/рік-км); Німеччина (чавунні труби – 0,25 1/рік-км, сталеві труби – 0,18 1/рік-км), Швеція (чавунні труби – 0,1 1/рік-км, сталеві труби – 0,1131/рік-км).

Література

1. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування [Текст]. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 281 с.
2. Правила надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення [Текст]. – Кабінет Міністрів України, 2005. – № 630.
3. Ткачук, О. А. Гідрравлічні розрахунки діючих водопровідних труб [Текст] / О. А. Ткачук // Водопостачання та водовідведення. – 2008. – № 2. – С. 2–6.
4. Новохатний, В. Г. Надійність подавально-розподільного комплексу систем водопостачання [Текст] / В. Г. Новохатний // Науковий вісник будівництва. – 2008. – Вип. 48. – С. 215–218.
5. Новохатний, В. Надійність водоводов систем водоснабження [Текст] / В. Новохатний, С. Костенко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – Vol. 15, Issue 6. – P. 101–108.
6. Новохатний, В. Надійність охладительных систем оборотного водоснабження [Текст] / В. Новохатний, С. Костенко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2014. – Vol. 16, Issue 6. – P. 77–84.
7. Матяш, А. Надійність водоснабження малых населенных пунктов [Текст] / А. Матяш, В. Новохатний, С. Костенко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2015. – Vol. 17, Issue 6. – P. 95–102.
8. Новохатний, В. Г. Надійність водопровідних труб за даними експлуатації [Текст] / В. Г. Новохатний, О. В. Матяш // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 51. – С. 136–140.
9. Орлов, В. А. Реконструкция трубопроводных систем [Текст]: уч. пос. / В. А. Орлов, С. В. Храменков, О. Г. Примин. – М.: Ассоциация строительных вузов (АСВ), 2008. – 280 с.

10. Свинцов, А. П. Оценка надежности трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения в городах Ирака [Текст] / А. П. Свинцов, Аль-Харам Тами // Вестник РУДН. – 2011. – № 2. – С. 5–10.
11. Tchorzewska-Cieslak, B. Failure scenarios in water supply system by means of fault tree analysis [Text] / B. Tchorzewska-Cieslak, K. Boryczko, M. Eid // Advances in Safety, Reliability and Risk Management. – 2011. – P. 2492–2499. doi: 10.1201/b11433-354
12. Boryczko, K. Analysis of risk and failure scenarios in water supply system [Text] / K. Boryczko, R. Janusz, B. Tchorzewska-Cieslak // Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars. – 2014. – Vol. 5, Issue 2. – P. 11–18.
13. Faidae, M. J. Estimation of Failure Probability in Water Pipes Network Using Statistical Model [Text] / M. J. Faidae, R. Tabat // World Applied Sciences Journal. – 2010. – Vol. 11, Issue 9. – P. 1157–1163.
14. Forsyth, P. Codified methods to analyse the failures of water pipelines: A Review [Text] / P. Forsyth, D. Robert, P. Rajeev, C. Li, J. Kodikara // Proceedings of the 8th Australasian Congress on Applied Mechanics 2014 (ACAM 8). – 2014. – P. 529–539.
15. ДСТУ 8647:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і (або) експлуатації в умовах малої статистики відмов [Текст]. – К.: Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (ІПММС НАНУ), 2016. – 54 с.
16. Володарський, Є. Т. Статистична обробка даних [Текст]: навч. пос. / Є. Т. Володарський, Л. О. Кошева; Національний авіаційний університет. – К.: НАУ, 2008. – 308 с.
17. Rajeev, P. Factors contributing to large diameter water pipe failure [Text] / P. Rajeev, J. Kodikara, D. Robert, P. Zeman, B. Rajani // Water asset management international. – 2014. – P. 9–14.
18. Rajeev, P. Factors contributing to large diameter water pipe failure as evident from failure inspection [Text] / P. Rajeev, J. Kodikara, D. Robert, P. Zeman, B. Rajani // Strategic Asset Management of Water and Wastewater Infrastructure: Leading Edge Strategic Asset Management (LESAM13). – 2013. – Available at: <http://www.criticalpipes.com/wp-content/uploads/2013/09/JKodikara.pdf>
19. Szpak, D. Assessment of the failure rate of water supply system in terms of safety of critical infrastructure [Text] / D. Szpak, B. Tchorzewska-Cieslak // Chemik. – 2014. – Vol. 68, Issue 10. – P. 862–867.