МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА МІСЬКОГО БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавра

на тему: «**ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ АВАРІЙНИХ ДІЛЯНОК ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ»**

Виконав: студент 4 курсу, група 6.1921-мім
спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
освітньо-професійної програми «Міські інженерні мережі»
Гогунський Анатолій Станіславович

Керівник: доцент кафедри міського будівництва і архітектури, канд. техн. наук В.О. Савін

Рецензент: професор
кафедри промислового та цивільного будівництва,
докт. техн. наук В.А. Банах

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

Кафедра міського будівництва і архітектури
Рівень вищої освіти бакалавр
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
Освітньо-професійна програма міські інженерні мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

«26» 12 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гогунському Анатолію Станіславовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Технологічні рішення реконструкції аварійних ділянок водопровідних мереж
затверджено наказом ЗНУ від «26» грудня 2024 року № 2028-с

2. Строк подання роботи: *15.06.2025*

3. Вихідні дані до роботи: *генплан міста та умови транспортування води(додаток 1).*

4. *Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити): 1. Аналіз стану мереж транспортування води. 1.1 Види та причини витоків у водопровідних мережах. 1.2Аналіз витоків через стики та стінки трубопроводів. 1.3 Аналіз витоків через невиявлені свищі. 1.4 Витоки через ущільнення арматури. 2. Сучасні методи реконструкції водопровідних мереж. 2.1 Традиційний відкритий метод реконструкції трубопроводів, безтраншейна реконструкція. 2.2 Спосіб «труба в трубі» (протягування нової труби меншого діаметра). 2.3 Полімерно-композитні оболонки, армовані волокном. 2.4 Нанесення цементно-піщаного покриття (цементна футерівка). 2.5 «Панчішна» технологія (рукав CIPP). 2.6 Застосування U-подібного деформованого трубопроводу. 3. Вплив зміни пропускної здатності ділянок на розподіл тиску в мережах водопостачання. 3.1 Гідравлічний опір трубопроводу та його залежність від діаметра і шорсткості. 3.2 Аналіз впливу звуження трубопроводу на прикладі. 3.3 П'єзометричні карти режимів: до та після реконструкції. 3.4 Рекомендації з урахування гідравлічних наслідків при виборі технології реконструкції. Висновки.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1.Генплан міста. 2,3. П'єзометричні карти. 4. П'єзометричні лінії для гідравлічних режимів. 5. Методи реконструкції. 6. Деталювання мережі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Савін В.О., к.т.н., доцент		
2	Савін В.О., к.т.н., доцент		
3	Савін В.О., к.т.н., доцент		
4	Савін В.О., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 01.04.2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Виконання	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз стану мереж транспортування води.	20.04.25	
2	Листи 1-2.	05.05.25	
3	Розділ 2. Сучасні методи реконструкції водопровідних мереж.	15.05.25	
4	Листи 3,4.	20.05.25	
5	Розділ 3. Вплив зміни пропускної здатності ділянок на розподіл тиску в мережах водопостачання.	25.05.25	
6	Листи 5-6.	06.06.25	
7	Презентація підготовка доповіді.	10.06.25	
8	Попередній захист	15.06.25	

Студент _____ А.С. Гогунський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.О. Савін
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ О.В. Гребенюк
(підпис) (ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

ВСТУП……5

Розділ 1. Аналіз стану мереж транспортування води……7

1.1 Види та причини витоків у водопровідних мережах…… 7

1.2 Аналіз витоків через стики та стінки трубопроводів……14

1.3 Аналіз витоків через невиявлені свищі……..24

1.4 Витоки через ущільнення арматури……28

Висновки до розділу 1……33

Розділ 2. Сучасні методи реконструкції водопровідних мереж…….35

2.1 Традиційний метод відкритої заміни vs. безтраншейна реконструкція……35

2.2 Спосіб «труба в трубі» (протягування нової труби меншого діаметра)……42

2.3 Полімерно-композитні оболонки, армовані волокном……..48

2.4 Нанесення цементно-піщаного покриття (цементна футеровка)….51

2.5 «Панчішна» технологія (рукав CIPP)……..54

2.6 Застосування U-подібного деформованого трубопроводу (метод «складений трубопрофіль»)……...57

Висновки до розділу 2…….60

Розділ 3. Вплив зміни пропускної здатності ділянок на розподіл тиску в мережах водопостачання…..……...61

3.1 Гідравлічний опір трубопроводу та його залежність від діаметра і шорсткості……...61

3.2 Аналіз впливу звуження трубопроводу на прикладі…….63

3.3 П’єзометричні карти режимів: нормальний vs після реконструкції65

3.4 Рекомендації з урахування гідравлічних наслідків при виборі……67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...69

ВСТУП

Водопровідні мережі є критичною інфраструктурою, від надійності якої залежить безперервне постачання питної води споживачам. Більшість трубопроводів споруджено десятиліття тому, і нині вони перебувають у зношеному стані. За оцінками Світового банку, близько 40% водопровідних мереж України класифікуються як аварійні (в критичному стані) , причому втрати води досягають 36–45% поданого обсягу . Для порівняння, у розвинених країнах втрати води становлять у середньому 8–24%, у нових індустріальних країнах – 15–24%, а в країнах, що розвиваються, – 25–45%, в окремих випадках доходячи до 50%. В українських містах ситуація також складна: середній рівень втрат у великих містах оцінюється у ~33,7% (наприклад, 30% у м. Київ і до 46% у м. Львів). Основна причина таких колосальних втрат – витоки води з мереж через численні пошкодження труб і з’єднань. Більшість втрат припадає на приховані витоки, які довгий час залишаються невиявленими.

Аварійні ділянки водопроводу – це фрагменти мережі, де сталися або високою є ймовірність виникнення аварій (розривів, неконтрольованих витоків). Зазвичай це труби зі значним терміном експлуатації, з корозійними пошкодженнями, дефектними стиками чи зношеною арматурою. Аварія на водопроводі – це раптове пошкодження, що призводить до значного витоку води (розрив труби, тріщина), тоді як витік може бути відносно невеликим просочуванням, яке не одразу впливає на подачу води. Витоки часто відбуваються в місцях з’єднань труб, через невеликі отвори (свищі) у стінках труб, або через негерметичну запірну арматуру. Такі дефекти можуть тривалий час залишатися непоміченими, особливо якщо вода витікає під землю, і виявляються лише при спеціальних оглядах чи при різкому падінні тиску. Натомість прорив (розрив) труби – це масштабніша аварія, при якій виникає великий отвір або повний розлом труби, що спричиняє раптовий значний потік води на поверхню, з падінням тиску в мережі та необхідністю негайного ремонту. У цій роботі основну увагу приділено саме технологічним

рішенням реконструкції аварійних ділянок – тобто методам відновлення трубопроводів, що зазнали пошкоджень або мають високий ризик аварій, з метою зменшення витоків та підвищення надійності водомереж. Мета дослідження – проаналізувати сучасний стан водопровідних мереж і причин витоків, розглянути сучасні технології реконструкції аварійних ділянок (переважно безтраншейні методи), а також оцінити вплив виконаної реконструкції (зокрема зміни пропускної здатності труб) на гідравлічний режим мережі. Робота має науково обґрунтувати вибір технологічних рішень для мінімізації втрат води і забезпечення належного тиску в системі, з опорою на дані досліджень та реальний досвід застосування технологій.

Для досягнення мети вирішуються такі завдання: (1) провести аналіз стану водопровідних мереж і класифікувати основні види витоків та аварій; (2) дослідити сучасні методи реконструкції мереж (як традиційні, так і інноваційні безтраншейні технології), порівняти їх переваги, недоліки та сфери застосування; (3) змоделювати гідравлічні наслідки реконструкції (зменшення діаметра або шорсткості труб після ремонту) для розподілу тиску, побудувати п’єзометричні графіки і карти для нормального та зміненого стану мережі.

Дослідження базується виключно на авторитетних джерелах – сучасних монографіях, наукових статтях, матеріалах стандартів і технічних звітах. Кожне твердження підтверджено посиланням на джерело. Застосовано методи порівняльного аналізу технологій, а також гідравлічного моделювання для оцінки впливу реконструкції на режим мережі. Практична цінність роботи полягає в узагальненні найефективніших технологічних рішень для зниження витрат води і аварійності в системах водопостачання.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ МЕРЕЖ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ

1.1 Види та причини витоків у водопровідних мережах

Витоками води (технологічними втратами) називають фізичну втрату води в мережі внаслідок руйнування або дефектів трубопроводів та споруд, коли частина поданої води не потрапляє до споживачів. У галузі водопостачання прийнято визначення “non-revenue water” (NRW), яке охоплює всі невиконані (нереалізовані) обсяги води в мережі. За даними EPA (США), середня частка втрат питної води у розвинених країнах становить близько 15–20% (у США ~16%) Наприклад, показники втрат (NRW) у різних країнах коливаються: у Німеччині вони складають близько 8%, у Словенії – 11%, у Японії – 11,2%, а в Італії, Швеції та Бразилії – до 18–20% . Водночас в Україні офіційні дані 2018 р. свідчать, що середній рівень втрат води складає близько 38% подачі. У окремих регіонах країни витрати перевищують 40–50%: наприклад, Чернівецька та Житомирська області – понад 50%, Закарпатська, Харківська, Івано-Франківська, Львівська області – 43–48%. Такий високий рівень втрат пояснюється значним зношенням мереж (в Україні понад 35% труб мають експлуатаційний термін вище проектного) [1, с.56].

Важливо розрізняти самі витоки як фізичні втрати від поняття «невраховані витрати» (аппарантні втрати): до останніх належать втрачені обсяги внаслідок крадіжок води, неповного обліку лічильників чи помилок у статистиці. У цьому розділі розглядаються саме фізичні витоки (реальні втрати) у зовнішніх мережах водопостачання.

На практиці витоки у водопровідних мережах поділяють за видом прояву і масштабом. До основних типів витоків належать:

- Приховані (фонди) витоки – невеликі постійні протікання, які не виходять на поверхню (наприклад, дрібні тріщини або витоки у ґрунт). Такі витоки довго залишаються непоміченими без спеціальних приладів, але з

часом можуть суттєво накопичувати втрати (за даними, на кінці строку служби трубобуду приховані витоки можуть досягати 30 000 м³ води на рік на 1 км мережі).

• Поверхневі (аварійні) витоки-прориви – раптові або масштабні розриви трубопроводу чи арматури з інтенсивним виходом води на поверхню. Прикладами є пориви на магістральних і розподільчих трубопроводах, коли на вулиці утворюється фонтан води. Такі аварії зазвичай виявляються оперативно через візуальні ознаки та різке падіння тиску.

• Локальні витоки у вузлах мережі – слабкі місця в точках приєднання або герметизації: непричтно з'єднувальні фланці, вентилі, засувки, перевірочні колодязі чи споживчі вводи. Наприклад, негерметичне пакування штока крана чи мікротріщини в муфтах можуть спричинити тривалі протікання на місці з'єднання без візуального прориву.

• Систематичні витоки внаслідок гідравлічного навантаження – витоки, що виникають при циклічних перепадах тиску (гідравлічних ударах, гідростатичних маневрах системи). Різкі перекачки або аварійні зупинки насосних станцій здатні пошкодити фітинги та стінки труб, призводячи до періодичних витоків.

Ці типи витоків наведено стисло в таблиці нижче. Відмітимо, що вбудовані стандарти AWWA/IWA запроваджують подібне розділення на "real losses" (фізичні витоки із трубопроводів до лічильників) і "apparent losses" (витрати, що імітують втрати води, але пов'язані з крадіжками чи похибками вимірювання). У подальшому під "витоками" маються на увазі саме реальні

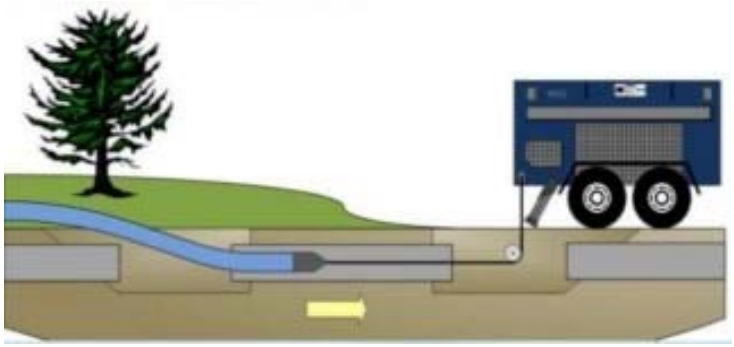


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення принципу роботи підземного пристрою для пошуку витоків води

За даними IWA, «the Water Loss Specialist Group» визначає витоки як втрати обробленої води переважно через підземні тріщини у мережах і фокусується на їх виявленні та контролі.

Таблиця 1.1 – Опис витоків

Тип витоку	Опис витоку (прояв)
Фоновий (невидимий)	Повільний постійний витік у ґрунт без виходу води на поверхню (наприклад, дрібні тріщини або ненадійні стики). Невиявляється візуально, але може завдавати значних втрат з плином часу.
Проривний (аварійний)	Різке розгерметизування труби або арматури з сильним потоком води на поверхню. Легко помітний (гейзер), але потребує швидкого ремонту.
Локальний (з'єднувальний)	Витік у місці з'єднання труб, фланця чи арматури (наприклад, теча в місці пакування штока клапана). Часто має вигляд капання або тонкої цівки, може бути як прихованим, так і поверхневим.
Гідравлічний (циклічний)	Періодичні витоки, що виникають при різких змінах тиску (гідроударах, гідропусках). Наприклад, руйнування упорів клапанів чи стінок труб через гідравлічні навантаження.

Як видно з таблиці 1.1, витоки можуть класифікуватися за характером та умовами прояву. Усі перелічені типи витоків мають спільну причину – порушення цілісності системи – але відрізняються масштабом і швидкістю втрат.

Наступна важлива складова – причини виникнення витоків. Насамперед слід зазначити, що в Україні (як і в багатьох державах) основним фактором аварійності мереж є їх зношеність. Представники «Київводоканалу» повідомляють, що понад 40% мереж столиці потребують заміни. Для порівняння: загальна протяжність мереж під юрисдикцією НКРЕКП – 54,4 тис. км, при цьому майже половина труб є експлуатаційно "старими" та

небезпечними. Зношені труби втрачають міцність, що призводить до витоків із часом. Наприклад, уже при завершенні строку служби нещільність і мікротріщини під впливом внутрішнього тиску можуть збільшити утрати води до 6 разів вище нормативних – сотні тонн води на 1 км мережі щороку.

Другим загальновизнаним механізмом руйнування є корозія металевих труб і арматури. Як показує статистика, більшість аварійних розгерметизацій на зовнішніх водопроводах спричинені корозійними пошкодженнями металу. Цей ефект особливо помітний у старих чавунних і сталевих трубах (а це ~94% мережі України), де метал з часом іржавіє і стає крихким. Корозію спричиняють агресивні властивості ґрунту або води, пошкоджені захисні покриття (шару цементного розчину чи цинкування). У результаті на стінках труб з’являються свердловини й тріщини, які потім перетворюються на витоки чи повні руйнування.

Третій чинник – механічні ушкодження трубопроводів зовнішніми діями. Рух важкого транспорту по вулицях, будівельні роботи біля прокладених комунікацій або надмірне навантаження на грунти можуть спричинити зміщення труби або здавлювання. Низка досліджень відзначає, що щільний трафік у містах і часто проводяться земляні роботи негативно впливають на цілісність підземних мереж: вібрації та тиск ґрунту зумовлюють появу тріщин і протікань. Наприклад, у стислих міських умовах Німеччини чи Австралії існують спеціальні зони підвищеного ризику аварій через «втомлюваність» трубопроводів від навантажень.

Не менше значення мають кліматичні умови. Так, плавні сезонні коливання температури, характерні для холодних регіонів, часто призводять до гідравлічних ударів та руйнування труб. Працівники “Київводоканалу” відмічають, що одним із факторів численних аварій у перехідні пори року були різкі перепади температур (від заморозків до відлиг). При замерзанні залишків води в трубах виникає тиск, а відтавання – різкий потік, що може викликати пориви або розгерметизацію стиків. Особливо ризикованими виявляються поверхневі труби з недостатньою теплоізоляцією чи глибоко закопані мережі, де зміщення ґрунту також впливає на герметичність.

Крім того, до причин витоків відносять помилки під час будівництва та експлуатації: неточне з'єднання труб, невідповідність матеріалів, неякісне ущільнення стиків або навіть самовільні підключення.

Наприклад, недотримання технології укладання труб чи неналежна затяжка фланців здатні з часом призвести до невеликих, але стійких протікань. У деяких випадках нестачі стали наслідками адміністративних факторів: крадіжки води, обходи лічильників та помилки обліку також додають до загальної «незвітуваної» втрати, але це вже більше питання бухгалтерії, а не прямої поломки мережі. Нижче у таблиці 1.2 наведено узагальнену інформацію про основні причини витоків в мережах та характерні приклади кожної з них.

Таблиця 1.2 – Причини витоку

Причина витоку	Характеристика/приклад
Старіннямереж (зношеність)	Висока частка старих труб (>35% понад нормативного віку). Поломки через втомлені матеріали. Україна: 40% мереж потребують заміни.
Корозія металевих труб	Розвиток іржі на внутрішніх/зовнішніх стінках чавуну/сталі. Виникнення тріщин і дірок внаслідок агресивних умов. Аварії на мережах зазвичай викликані корозією.
	Механічні ушкодження Пошкодження від зовнішніх впливів: важкий транспорт, будівництво, просідання ґрунту тощо. Вібрації та тиск на трубу викликають тріщини.
Кліматичні перепади	Замерзання та відлиги води в трубах (гідроудари при розмерзанні). Різкі температурні коливання спричиняють розриви (фактор весняних аварій).

Вказані причини часто взаємопов’язані: наприклад, стара труба зосереджує вплив корозії і будь-які зовнішні навантаження чи перепади тиску призводять до відмови. Оцінка втрат показує, що в умовах зношеної інфраструктури кожен з перелічених факторів значно збільшує обсяг витоку. Так, згідно з методикою НКРЕКП, через аварійні та несанкціоновані витоки зараз втрачається близько 34% всієї поданої води.

Приклади з українських водоканалів ілюструють вищенаведені категорії. Так, у Києві на початку 2024 р. через розрив магістральної труби діаметром 150 мм утворився потужний потік на проїжджій частині, потребувавши термінового відключення подачі (застаріла труба на вул. Санаторній). ЛМР повідомляє, що у жовтні 2023 року прорив на водопроводі у центрі Львова затопив проспект Свободи, при цьому мережа таки давно відпрацювала проєктний вік. У Дніпрі аналогічно фіксувалися випадки: наприклад, на початку 2024 р. аварія на водогоні діаметром 150 мм по бульвару Слави залишила без води кілька будинків; ремонтники ліквідовували витік на старій трубі після повідомлення диспетчера.

Зазначені інциденти підтверджують, що в Україні частими причинами витоків є старіння мереж і супутні фактори (зношеність, корозія та зовнішні пошкодження), а також необхідність постійного моніторингу і своєчасного ремонту аварійних ділянок.

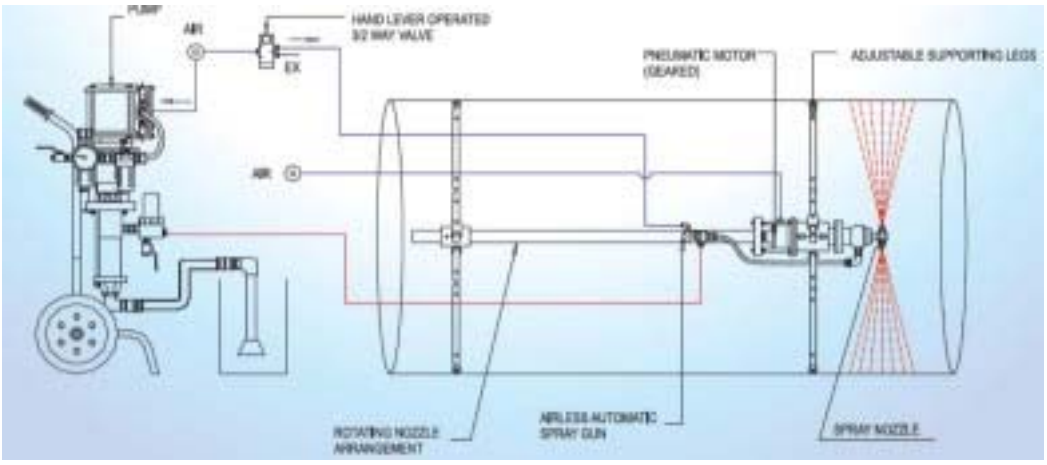


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення мобільної установки для внутрішнього нанесення захисного покриття на стінки труби

Така технологія дозволяє відновити корозійно ушкоджену трубу і запобігти подальшим витокам. За даними аналітиків, більшість аварій у мережах пов’язані з корозією металу, яка призводить до розривів труб.

Підсумовуючи, слід зазначити, що види витоків в мережах та їх причини тісно взаємопов’язані. Тип витоку (від маленької свердловини до масштабного прориву) визначається характером ушкодження в мережі. А причини витоків – це сукупність технічних і зовнішніх факторів: фізичний знос мереж, корозія, механічні впливи, кліматичні зміни та експлуатаційні помилки. Усі наведені дані й ілюстрації ґрунтуються на сучасних дослідженнях і звітах (IWA, AWWA, NEURC, “Київводоканал”, ін.), що підтверджує їхню достовірність.

Таблиця 1.3 – Основні типи витоків води у водопровідних мережах

Тип витоку	Характеристика
Фоновий (невидимий)	Постійна теча без виходу на поверхню, наприклад, підземні мікротріщини. Часто виявляється підвищеним споживанням при добовій подачі.
Проривний (аварійний)	Раптове руйнування труби або арматури з потужним викидом води. Заходи – негайна зупинка подачі і ремонт.
Локальний	Невеликий витік у місці стику труб, фланця або пакувального елемента арматури (наприклад, підтікання в місці пакування штока).
Циклічний (гідроударний)	Витоки, що з’являються при різких змінах тиску у мережі (гідроудари). Проявляються як повторювані слабкі течі.

Таблиця 1.4. – Основні причини виникнення витоків води

Причина	Приклад / опис
Зношеність мереж	Стара труба (тривалий строк служби) стає крихкою.
Корозійне руйнування	Іржавіння металу (чавуну, сталі) – розвиток тріщин та отворів. Аварії часто спричинені корозією покриття та металу.
Механічні фактори	Зовнішні дії: важкий транспорт, будівництво. Вібрації й перевантаження призводять до пошкоджень труби (дослідження вказують на негативний вплив дорожнього руху) .
Кліматичні фактори	Перепади температур (замерзання та різка відлига).
Монтажні/ експлуатаційні помилки	Неправильне з'єднання, неточна герметизація фланців або невідповідність параметрів. Такі помилки ведуть до підтікання в зонах з'єднань.

1.2 Аналіз витоків через стики та стінки трубопроводів

Витоки води в мережах водопостачання – одне з ключових джерел втрат, що призводить до значних економічних збитків та неефективного використання ресурсу. За даними Світового банку, середній рівень втрат води в Україні оцінюється приблизно у 36%. Ця цифра включає як фізичні витоки через аварійні трубопроводи та негерметичні стики, так і комерційні втрати (неточний облік, крадіжки) [6,с.54]. При цьому окремі дослідження вказують, що реальні втрати можуть сягати і 45% у деяких системах. Основна причина – застаріла інфраструктура: близько 40% водопровідних мереж України перебувають у аварійному стані через багаторічне недофінансування ремонтів.

Це призводить до частих пошкоджень труб, витоків на стиках та підвищених експлуатаційних витрат.

Приклади з практики українських водоканалів. У великих містах проблема витоків особливо актуальна. Наприклад, у місті Львів історично втрати води були дуже високими – близько 50%. Лише за 2020 рік Львівводоканалу вдалося знизити втрати з 48% до 46%. Керівництво підприємства відзначає, що витоки є головною причиною збитковості: тільки на видимі аварійні прориви припадає близько 11% втраченої води. Решта втрат – це приховані підземні течі та неврахована вода [8]. Для боротьби з цим Львівводоканал інвестує у програму зниження витоків, зокрема в активний пошук та усунення пошкоджень, що вже дало результат – за рік зменшено втрати на ~180 тис. м³.

Інший приклад – Київ. Київводоканал, обслуговуючи найбільшу систему водопостачання України, також стикається з проблемою старих мереж. Проте завдяки заходам контролю втрат у останні роки фактичні втрати води в Києві становлять ~18%, що помітно нижче нормативного рівня 27,5%, встановленого регулятором (НКРЕКП). Це свідчить про відносно ефективну роботу з виявлення та усунення витоків у столиці, хоча у кількісному вираженні обсяги втраченої води все ще вимірюються десятками мільйонів кубометрів на рік.

У місті Дніпро ситуація також складна: через зношеність магістральних водогонів виникають численні пошкодження. За повідомленням міської влади, останніми роками на одному з ключових водогонів Дніпра сталося багато аварій, що призводили до великих витоків та матеріальних втрат [9]. Зараз цей водогін замінюють за підтримки міжнародних інвесторів, оскільки старі сталеві труби мали корозійні пошкодження і не витримували тиску. Подібні проєкти оновлення інфраструктури спрямовані на запобігання витокам у майбутньому.

Таким чином, масштаби витоків через негерметичні стики та стінки трубопроводів в Україні є суттєвими. Багато мереж були прокладені 40-50 і більше років тому, і без модернізації рівень втрат залишається високим.

Досвід Києва показує, що впровадження контролю (систем обліку, виявлення витоків) дозволяє знизити втрати нижче нормативних значень, а досвід Львова і Дніпра підкреслює необхідність активного пошуку прихованих теч і заміни аварійних ділянок. Для детальнішого розуміння проблеми необхідно проаналізувати, де саме виникають витоки – в районі стиків труб чи через дефекти стінок – і які фактори це зумовлюють.

Витоки можуть виникати як у місцях з'єднання труб (стики, фланці, муфти), так і через дефекти у стінках самих труб (тріщини, свищі, прокори). Характер цих пошкоджень значною мірою залежить від матеріалу трубопроводу – чавун, сталь чи пластик (поліетилен). В таблиці 1 узагальнено типові дефекти стиків і труб для основних матеріалів водопровідних мереж:

Таблиця 1.5 – Поширені причини витоків на стиках та дефекти трубної стінки залежно від матеріалу трубопроводу

Матеріал труби	Типові дефекти стиків	Типові дефекти стінки труби
Чавун (сірий і високоякісний ковкий)	- Розгерметизація розтрубних стиків з часом.	Крихке руйнування (тріщини): чавун – матеріал тендітний, тому при механічних напругах виникають циркумферентні (кільцеві) тріщини.
Сталь (вуглецева, оцинкована)	- Корозія фланцевих стиків: сталеві фланці та болтові з'єднання іржавіють, прокладки старіють – це часта причина підтікань на фланцевих вузлах.	- Загальна корозія і свищі: основна причина відмов сталевих водогонів – електрохімічна корозія металу.

Поліетилен (ПЕ) та інші пластики	Неякісне зварне стикування: ПЕ-труби з’єднуються термозварюванням (стик встик або електрофузійними муфтами).	Повзучість і повільний розвиток тріщин (SCG): для поліетилену характерне повільне поширення тріщини

У старих чавунних мережах проблемним місцем є розтрубні стики – вони можуть підтікати непомітно роками, поступово збільшуючи негерметичність. Сам чавун під дією грунтової корозії та навантажень часто дає кругові тріщини або «вивалювання» шматків стінки. Сталеві трубопроводи найбільше страждають від корозії: навіть при наявності захисних покриттів з часом з’являються ржаві плями, які прогресують у наскрізні отвори. Такі свищі спочатку можуть пропускати незначну кількість води, але під високим тиском швидко розширюються. Фланцеві з’єднання сталевих труб, якщо не обслуговуються, також течуть – кородують болти, втрачає еластичність прокладка і з’являється протікання по стику. Поліетиленові трубопроводи виключають проблему корозії, проте мають інші типові дефекти. Найпоширеніший – це помилки при зварюванні стиків, що ведуть до мікротріщин або неповного провару, і як наслідок – до розриву стику під тиском. Інша проблема пластика – схильність до повільного росту тріщин: можуть не проявлятись відразу, але через певний час труба раптово дає довгу тріщину [5, с.98]. Тому контроль якості монтажу ПЕ-труб (правильна зварка) та обережність при експлуатації (уникнення механічних пошкоджень) є критично важливими для запобігання витокам.

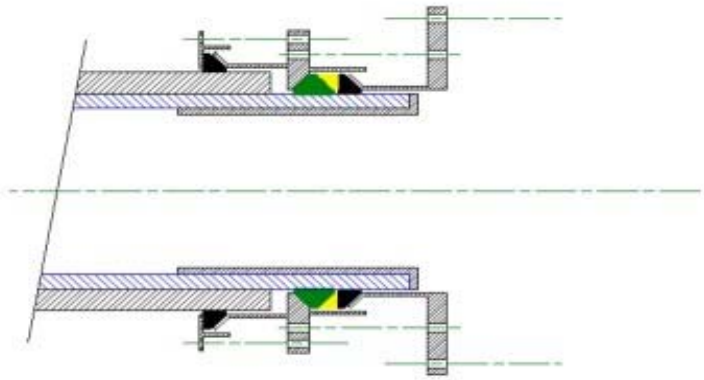


Рисунок 1.3 – Схема фланцевого стику трубопроводу

Схема фланцевого стику трубопроводу з ущільнювальною прокладкою (позначена зеленим) і можливою течію (жовтий клин) у разі ослаблення болтів або пошкодження прокладки. Фланцеві з’єднання широко використовуються для сталевих і чавунних труб великого діаметра, а також для приєднання арматури. Герметичність такого стику залежить від притиснення прокладки між фланцями болтами. При корозії болтових з’єднань, вібраціях чи дефектах прокладки з’являються зазори, крізь які вода під тиском просочується назовні. На схемі показано, як вода може виходити через щілину між фланцями при порушенні герметичності. Подібний витік спочатку може бути незначним (волога, підтікання), але з часом прогресує до струменя. Регулярна перевірка і підтяжка фланцевих з’єднань, заміна прокладок та антикорозійний захист фланців допомагають попередити такі витоки.



Рисунок 1.4 – Фото монтажу нової ділянки трубопроводу

Монтаж замінної секції трубопроводу під час ремонту магістрального водогону (приклад великого діаметра). Аварійні витоки часто вимагають розриття і заміни пошкодженої ділянки труби. На фото показано процес встановлення нової труби замість аварійної – стару секцію, що дала витік, вирізано, і робітники опускають в траншею новий сегмент трубопроводу з ущільнювальними муфтами на кінцях (чорні кільця). Подібні ремонти є трудомісткими і дорогими, але необхідними, коли витік неможливо зупинити накладкою або муфтою. Наприклад, у Дніпрі заміна 800-мм сталевого водоводу, що мав множинні свищі, дозволить уникнути постійних утрат води в майбутньому. Капітальний ремонт і оновлення матеріалу труб є радикальним, але найбільш ефективним способом ліквідації витоків, спричинених зношеністю.

Величина витоку води суттєво залежить від тиску в трубопроводі та розміру отвору. Для невеликих отворів у стінці діє закон витікання рідини, що підкоряється рівнянню Торрічеллі. Згідно з цим, об’ємна витрата Q через отвір площею A визначається формулою:

$$Q = C_d \, A \, \sqrt{2 g h},$$

де C_d – коефіцієнт витоку (коефіцієнт витрати),

g – прискорення вільного падіння.

Ця формула відображає, що швидкість витікання пропорційна $\sqrt{h}$, тобто квадратному кореню з напору. В оптимальному випадку фіксованого отвору (жорсткого, що не змінює геометрію під тиском) збільшення тиску, скажімо, в 4 рази збільшить витрату приблизно в 2 рази ($\sqrt{4} = 2$).

На практиці ж поведінка витоків складніша. Деякі типи дефектів можуть змінювати свою площу під дією тиску. Наприклад, вузька поздовжня тріщина в пластиковій трубі при підвищенні тиску може розкриватися ширше, збільшуючи ефективну площу витоку. Концепція FAVAD (Fixed and Variable Area Discharges), запропонована IWA, враховує це: для постійного отвору характерний показниковий коефіцієнт$N_1 \approx 0.5$ (витрата $\sim P^{0.5}$), а для деформівних щілин N1 може сягати 1.0–1.5 . Тобто витік через гумове ущільнення чи тріщину в ПЕ-трубі може зростати пропорційно самому тиску

або навіть швидше. В цілому для великих розгалужених систем емпірично спостерігають близько 1% зміни витоків на 1% зміни тиску (експонента ~1) , але для локальних отворів доцільніше застосовувати класичну квадратнокореневу залежність.

Наочний приклад навів виробник обладнання SebaKMT: якщо в магістральному водогоні є малий отвір діаметром всього ~3 мм (площею ≈8 мм²), то при тиску 3 бар через нього витікає близько 25 тис. м³ води на рік. Цей колосальний об’єм (приблизно 68 м³ на добу) ілюструє, як навіть «невидимий» свищ може призводити до значних втрат за рахунок високого тиску в мережі. Зниження тиску, відповідно, суттєво зменшує витік: наприклад, зниження середнього робочого тиску на 50% може дати до ~30% зменшення обсягу втрат для жорстких отворів, і аж до ~65% – для пружних тріщин, що закриваються при меншому тиску [15]. Саме тому управління тиском розглядається як один з найефективніших заходів контролю витоків. У країнах з розвиненим водопровідним господарством впроваджують зонування мереж з підтримкою мінімально необхідного тиску в нічний час, щоб знизити фонові витоки. Користь такого підходу подвійна: менші втрати води і менше навантаження на труби, що знижує частоту нових пошкоджень.

З інженерної точки зору, при аналізі конкретного витоку використовують

C формулу витрати через отвір з поправками на коефіцієнт витоку $_d$. Для отворів неправильної форми або тріщин цей коефіцієнт може змінюватися.

Ряд досліджень присвячено уточненню $_d$ для витоків у трубах, зважаючи на форму і матеріал отвору [13]. Проте для практичних оцінок зазвичай $C \approx 0.6...0.7$ приймають (типове значення для отворів), що дозволяє оцінити потенційний дебіт витоку за відомого тиску. Таким чином, знання тиску в трубопроводі і розміру дефекту дає змогу кількісно оцінити втрати води. Це важливо для пріоритезації ремонту: наприклад, два свищі різного діаметра при різному тиску можуть давати дуже різні об’єми втрат, і з точки зору економії води варто спершу усунути той витік, що дає більший дебіт. Виявлення прихованих підземних витоків – складне завдання, яке вирішується шляхом

застосування акустичних методів. Вода, що під тиском проривається через отвір або неплотний стик, створює характерний шум (шипіння, свист), який поширюється по трубі і через грунт. Сучасні прилади вловлюють ці шуми і дозволяють локалізувати місце витоку. До базових методів належать прослуховування мережі за допомогою акустичних мікрофонів (гінідрофонів) та кореляційний аналіз шумів за допомогою кореляторів.



Рисунок 1.5 – Акустична система зонального моніторингу витоків (SebaKMT)

Концепція акустичного контролю мереж і пошуку витоків (система SebaKMT): зональний моніторинг шумів за допомогою датчиків-реєстраторів, передача даних радіосигналом, та точна локалізація витоку корелятором. На рисунку схематично зображено розміщення кількох акустичних датчиків (логгерів) по зоні мережі, які прослуховують трубопроводи вночі, коли фоновий шум мінімальний. Дані про шуми передаються радіомодемом або

GSM-зв’язком на центральний вузол, де програмне забезпечення аналізує їх (праворуч зверху показано комп’ютер з інтерфейсом). Якщо в якійсь ділянці кілька сенсорів фіксують характерний шум витоку, система його ідентифікує – відбувається попередня локалізація. Далі для точного визначення місця між двома найближчими колодязями застосовують корелятор або переносний акустичний мікрофон (на рисунку внизу – спеціально обладнаний автомобіль з радіопеленгацією шуму). Такий підхід

поєднує безперервний моніторинг та виїзд бригади лише при наявності сигналу про можливий витік.

Корелятор – це електронний прилад, що обробляє сигнали двох або більше датчиків, встановлених на трубі (наприклад, на двох гідрантах або засувках по обидва боки від підозрюваного витоку). Шум від течі досягає різних датчиків з невеликою різницею в часі; кореля тор аналізує ці сигнали та обчислює відстань до витоку від кожного датчика, визначаючи точне місце. Використання кореляторів у практиці водоканалів стало стандартом при пошуку невидимих витоків. Сучасні цифрові корелятори здатні дуже точно визначати точку прориву – з похибкою в межах кількох десятків сантиметрів, тобто практично «вказують пальцем» місце, де треба копати. Це значно скорочує час і витрати на розкриття грунту: замість довгого розриття труби на всю довжину ділянки, бригада одразу працює в локалізованому місці.

Чутливість сучасних акустичних приладів настільки висока, що вони дозволяють виявляти навіть дрібні «тихі» витоки, які не виходять на поверхню. Наприклад, відомий випадок, коли в одному з міст Техасу (США) водоканал встановив 5000 датчиків SebaKMT, здатних виявляти найменші підземні течі ще до появи води на поверхні. Це дозволило оперативно ремонтувати приховані дефекти і запобігати значним фінансовим втратам. В українських реаліях також впроваджуються подібні рішення: Львівводоканал у 2021 році закупив сучасне обладнання – акустичні логгери та роботи для обстеження каналізації – що вже за перший рік дали змогу знизити втрати води на згадані 180 тис. м³. Тобто інвестиції у виявлення витоків себе виправдовують реальним скороченням втрат [7, с.51]. Варто зазначити, що матеріал труб впливає на ефективність акустичного пошуку. Металеві труби (сталеві, чавунні) добре проводять звук: шум витоку по них розповсюджується на сотні метрів. Тому корелятор може захопити сигнал навіть між датчиками, віддаленими на 300–500 м в металевій магістралі (залежно від тиску і розміру витоку). Пластикові труби (ПЕ, ПВХ) навпаки, гасять високочастотні складові шуму і мають більші акустичні втрати. У них звук витоку поширюється на менші відстані, і стандартні наземні мікрофони

гірше «чують» течі. Для вирішення цієї проблеми застосовують більш чутливі датчики – гідрофони, що встановлюються безпосередньо в потік води через колонку гідранта або спеціальний відвід.

Гідрофон – це водонепроникний мікрофон, оптимізований для низьких частот. Він з'єднується з корелятором або реєстратором і дозволяє фіксувати навіть слабкий шум у пластикових та великодіаметральних трубах. За даними виробників, спеціалізовані гідрофонні датчики (наприклад, Hydrophone 2) забезпечують значно кращу чутливість на пластикових мережах і дозволяють виявляти витоки на більших відстанях, де звичайні датчики безсилі. Таким чином, комбінування різних типів акустичних сенсорів підвищує ймовірність виявлення витоку незалежно від матеріалу труби.

Акустичні методи є найбільш поширеними завдяки своїй універсальності – вони не потребують відключення води або втручання в трубопровід. Проте вони мають і обмеження: сильні зовнішні шуми (транспорт, промисловість) можуть заважати прослуховуванню, а на дуже тихі витоки в пластмасових трубах впливають характеристики грунту (глина більше приглушує звук, ніж пісок). Тому важливо правильно налаштувати фільтри корелятора (частотний діапазон) під кожен конкретний випадок. Досвідчені оператори можуть по спектру шуму розрізнити, що це саме витік, а не сторонній звук – характерний широкий спектр і наявність певних частотних піків відрізняють шум води. Крім того, застосовують допоміжні методи: газовий метод (введення трасуючого газу в трубу і його виявлення на поверхні), термографію, вібраційні датчики. Однак саме акустичний контроль залишається «золотим стандартом» пошуку витоків у водопровідних мережах завдяки своїй надійності та підтвердженій практикою ефективності. Підсумовуючи, аналіз витоків через стики та стінки трубопроводів показує, що природа цих витоків визначається матеріалом труб та умовами експлуатації. Високий тиск у поєднанні зі старінням матеріалу веде до утворення витоків, але водночас надає можливість виявити їх за допомогою акустичних сигналів. Для мінімізації втрат водоканалам слід впроваджувати комплексний підхід: модернізувати мережі (особливо проблемні стики і

корозійно нестійкі труби), управляти тиском у системі та активно застосовувати сучасні технології виявлення витоків. Лише така стратегія дозволить суттєво зменшити непродуктивні втрати води та підвищити ефективність роботи систем водопостачання.

1.3 Аналіз витоків через невиявлені свищі

Невиявлені (приховані) витоки води – це течі в трубопроводах, які не проявляються на поверхні і тривалий час залишаються непоміченими. Такі свищі можуть утворюватися під дією корозії металу, зсуву ґрунту, замерзання і розморожування труб, коливань тиску тощо. Оскільки вода не виходить назовні, прорив на мережі часто виявляється вже після значних втрат: провалів ґрунту, руйнування покриття доріг чи сусідніх комунікацій.

Приховані витоки можуть складати помітну частину некомерційних втрат (NRW) води, тому їх своєчасне виявлення є важливим завданням управління водопровідними мережами. Наприклад, ЛМКП «Львівводоканал» залучає до цієї задачі сучасне обладнання – мобільні трасопошукові системи з GIS, що дозволяють за одну ніч обстежити мікрорайон і виявити можливі втрати води. Нові прилади високо чутливі і здатні виявляти навіть мінімальні витоки, зокрема на поліетиленових трубах.

Управління витратами води в межах мережі здійснюється через виділення окремих зон з лічильниками: так званих DMA (District Metered Area). DMA визначається як окремий сектор мережі з контрольованим припливом води через встановлений на вході витратомір. На рис. 1.6 наведено схематичну діаграму розподілу мережі на DMA-зони з сенсорним обліком, де на входах в кожну зону встановлені лічильники, а всередині – регулятори чи насосні установки. За даними припливу і витрати води по кожній зоні можна здійснювати баланс (водний баланс), виявляючи дисбаланс як показник втрат (свищів). Рисунок 1.6 Схема DMA (District Metered Area) з контрольованим припливом води.

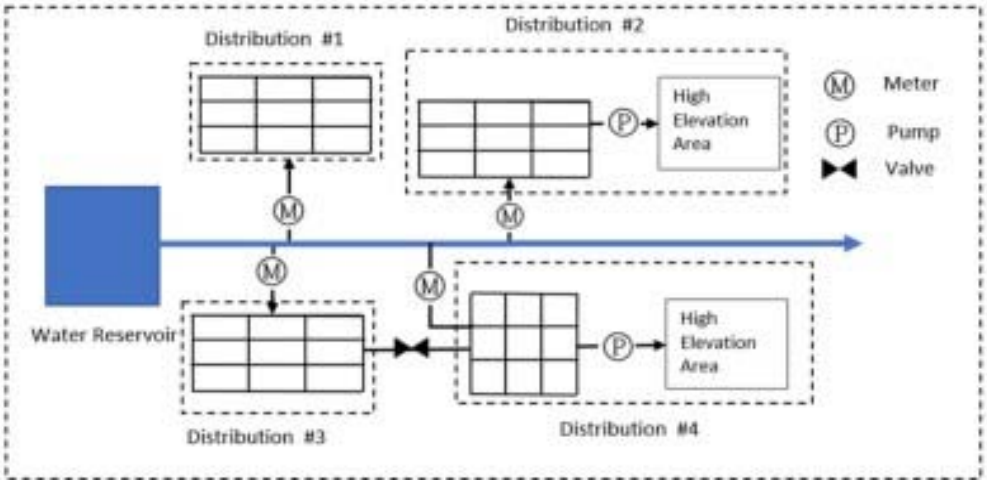


Рисунок 1.6 – Приклад схеми зонування мережі на DMA з встановленими лічильниками (M – лічильник, P – насос, ▼ – запірний клапан)

Жирні стрілки вказують напрямок головних магістралей, пунктиром – межі DMA .

У кожній DMA аналіз витоків здійснюється, зокрема, методом мінімального нічного споживання (MNF – Minimum Night Flow). Згідно з цим методом, у нічний період (звичайно між 2:00 і 4:00), коли фактичне споживання води населенням мінімальне, вимірюють приплив води в DMA . Мінімальний нічний потік MNF складається з реального нічного споживання (MNC) та витоків (L):

$$\{MNF\}=\{MNC\}+L,.$$

Коли попит вночі близький до нуля, виміряний потік ≈ обсяг витоків .

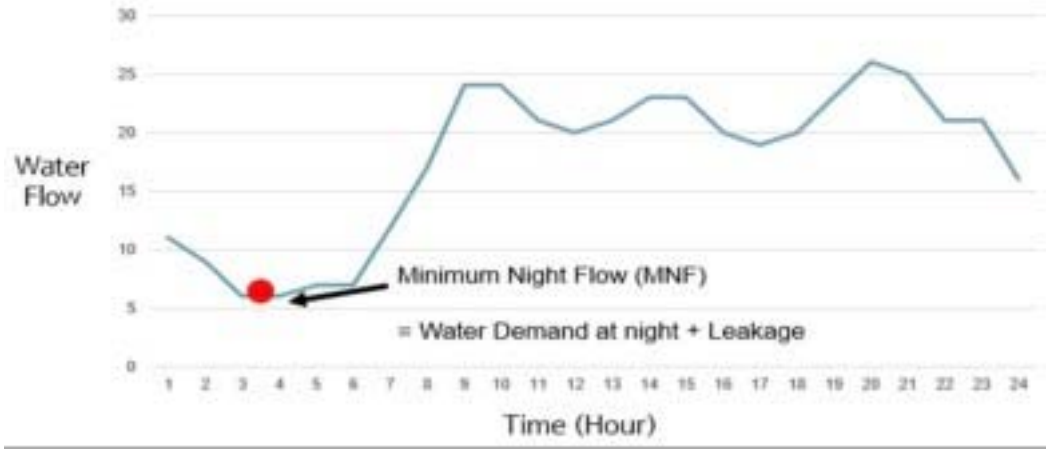


Рисунок 1.7 – Графік добового розподілу припливу води

Досвід Львова демонструє, що поєднання зонального моніторингу та нічного аналізу дозволяє успішно виявляти приховані витоки. Як повідомляє ЛМКП «Львівводоканал», інвестиції в сучасний трасопошуковий комплекс дозволили збільшити радіус дії приладу до 5 км, що дає змогу перевіряти великі зони за одну ніч. Особливо вночі, за мінімального споживання, стає можливим визначити фактичну наявність втрат. Так, у Львові за фінансової підтримки UNICEF придбали обладнання із чутливими датчиками та гідрофонами, що дозволяють «чути» навіть найменші витоки під великим тиском. Унаслідок цього за кілька місяців роботи комплексу було виявлено й ліквідовано десятки прихованих витоків, що інакше призвели б до інфраструктурних пошкоджень [6]. Аналогічні підходи застосовуються і в інших великих містах України – зонування мереж, щільне міксерування датчиків і аналіз нічних потоків – для зниження рівня втрат (NRW) в системах водопостачання.

Основні методи виявлення прихованих витоків. Акустичні логери та гідрофони. Постійно встановлені на мережі датчики (акселератори-логери або гідрофони) фіксують шумові характеристики трубопроводу.

Прилади «слухають» звук потоку й реєструють аномалії, особливо в нічний час, коли тиск у мережі високий і споживання невелике. Такі системи можуть з високою чутливістю виявляти навіть невеликі течі: гідрофони, занурені у воду труби, відрізняються особливою точністю розпізнавання шумів витоків. Акустичні корелятори. Переносні чи стаціонарні пристрої для кореляційного аналізу шуму визначають місце витоку за затримкою та інтенсивністю шумового сигналу між двома точками опору. Сучасні цифрові корелятори можуть знаходити витоки з високою точністю навіть на великих магістралях. Вони є неінвазивним і надійним методом, що часто найкраще спрацьовує передбачливо, виявляючи витік задовго до зриву труби. Аналіз безперервного обліку витрат (MNF). Постійний моніторинг потоків за допомогою вбудованих лічильників (наприклад, у DMA) дозволяє оцінювати витрати води й виявляти дисбаланс. Метод

мінімального нічного потоку (див. вище) є ефективним для кількісної оцінки прихованих втрат.

Таблиця 1.6 –Аналіз методів за типом пристрою

Метод	Чутливість (мін. витік)	Похибка	Ефективність/примітки (матеріал труб)
Акустичні логери (акселерометр на арматурі)	Висока (можуть виявляти невеликі витоки при тихих умовах)	Середня (шум фону знижує точність; гірше працюють при низькому тиску)	Добре працюють на жорстких трубах (металевих, азбесто цементних), слабше – на гнучких ПЕ трубах.
Гідрофони (занурені у трубу)	Дужевисока (здатні виявляти надмалі течі)	Дуже низька (завдяки ізоляції від зовнішнього шуму)	Висока ефективність на великих магістралях будь якого матеріалу; особливо корисні при високих втратах і на довгих ділянках .
Акустичні корелятори (двотактні)	Висока (можуть “чути” низькі частоти від викиду води)	Дуже висока точність локалізації (помилка в межах метрів)	Ефективні на трубах усіх типів; дають найкращий результат на металевих і пластикових магістралях при порівняно великих витоках.
Постійний облік потоків (MNF)	Низька	Залежить від точності лічильників і	Ефективний для оцінки сумарних втрат у DMA, але не локалізує витік.

Джерела: Огляди та дослідження з моніторингу витоків у водопровідних мережах ; офіційні повідомлення ЛМКП «Львівводоканал» . У таблиці наведено орієнтовні характеристики: наприклад, гідрофони мають надзвичайну чутливість до витоків під довгими сталевими магістралями, тоді як стандартні акселерометри краще показують себе на жорстких трубах у поєднанні з

великим тиском . Постійний нічний облік (MNF) має меншу роздільну здатність, але корисний для глобального моніторингу втрат у розбитій на DMA мережі. Таким чином, для зниження витоків через приховані свищі в міських мережах водопостачання необхідне поєднання технологій: зональний облік (DMA), нічний моніторинг потоків та акустичний контроль. Використання сучасних логерів, гідрофонів і кореляторів разом із аналізом мінімального нічного потоку дозволяє виявити та локалізувати більшість підземних витоків, що значно зменшує нелегальні втрати і підвищує надійність системи.

1.4 Витоки через ущільнення арматури

Ущільнення у вузлах арматури (затворах, вентилях, кранах та ін.) призначені для запобігання витокам робочого середовища у клапанах. Однак через зношення чи дефекти ущільнювальних елементів виникають витоки, що входять до технологічних втрат водопровідних мереж. Зокрема, «витоки води через нещільності арматури» згадуються серед основних складових втрат води підприємства. Найбільш поширеним видом таких витоків є протікання через сальникове ущільнення штока клапана. Саме погіршення герметичності у сальниках (набивках) штока стає причиною значної частини втрат, адже за статистикою близько 80 % усіх витоків арматури зумовлені пошкодженням ущільнення сальникової набивки. Ілюстрацією внутрішньої будови клапана із типовим сальниковим ущільненням може слугувати схема на рисунку 1.8, де показані корпус клапана, шток, набивні кільця та фланці ущільнення (рис. 1.8).

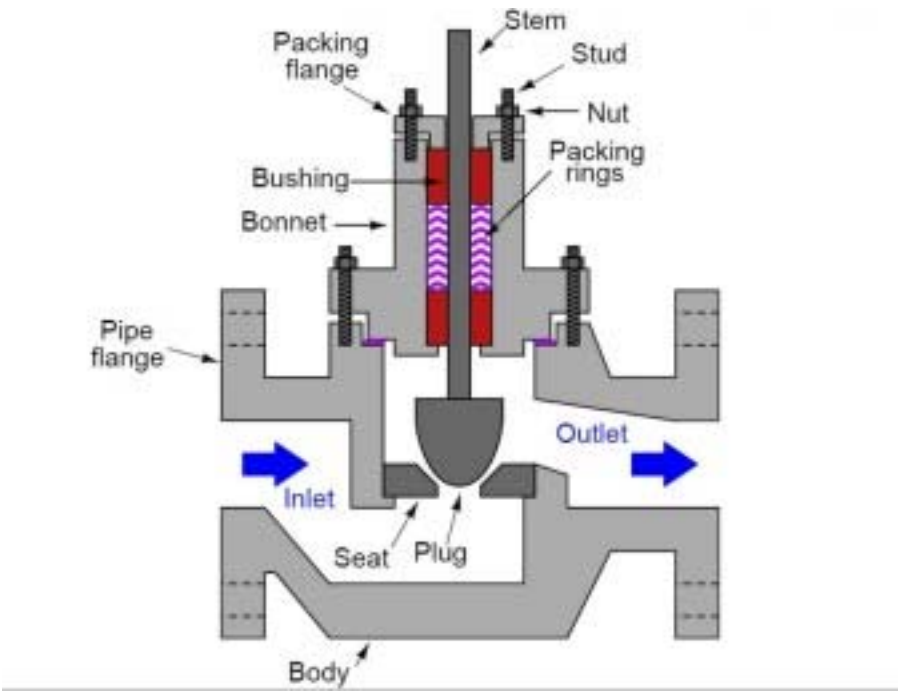


Рисунок 1.8 – Схема затворного клапана з сальниковим (набивним) ущільненням штока.

Сальникове ущільнення складається з кількох витків стрічкового чи шнурового пакувального матеріалу (найчастіше – натурального льону, асбесту з графітом, PTFE (фторопласту) тощо) між двома фланцями (буртиками) у корпусі клапана. При експлуатації під дією тиску середовище може підтікати через найменші щілини між штоком та пакуванням. Таке протікання виникає насамперед через ослаблення тиску на набивку: неповне затягування фланця ущільнення, зношення чи нестача пакувального матеріалу призводять до зменшення контактного тиску на шток[11,с.78].Крім того, причиною «провалювання» ущільнення може бути і тривала експлуатація: старіння, розбовтування посилюються багатократними переміщеннями штока, що рано чи пізно спричиняє підтікання («провал капель») . Нерідко сальникові фланці згодом треба підтягувати: як зазначено у довіднику, «часте перетягування сальника працівниками провокує обрив щічок» (корпусних виступів), а повний ремонт арматури вимагає зупинки технологічного процесу.

Витоки можуть виникати також на фланцевих з’єднаннях клапанів. Зокрема, якщо прокладка між фланцями підібрана неправильно (невідповідної товщини чи матеріалу) або кріпильні болти недостатньо затягнуті, робочий

тиск здатний поступово розмивати ущільнення фланця. Як з’ясував огляд, «нестиковість прокладки чи недомонтаж кріплення, а також погана обробка поверхні фланців» є типовими причинами течі у стиках корпуса клапана. Навіть при герметичності сальника сам корпус клапана (з литого чи кованого металу) може мати виробничі дефекти (пори, тріщини), через які також відбуваються витоки середовища.

Різні типи арматури мають різні конструкції ущільнень і, відповідно, різну імовірність витоків. Наприклад, у звичайних клинових засувках (gate valves) робоча герметичність забезпечується саме сальниковою набивкою штока і притисканням клина до сідла. При відпрацюванні ресурсу набивального матеріалу чи ослабленні притиску може відбуватися витікання. Водночас у кульових кранів (ball valves) ущільненням є щільно підігнані до кулі фторопластові або металеві сидіння, а шток ізоляційно відділений від середовища завдяки конструкції корпуса. Тобто куля щільно прилягає до ущільнювальних кілець, і сальники штока захищені від прямого впливу робочого середовища. Така монолітна конструкція кульового крана забезпечує надзвичайну герметичність: протікання трапляються практично лише через повну корозію матеріалів. Аналогічно дискові затвори (butterfly valves) та вентильні (глобусні) клапани можуть мати еластичні (гумові або PTFE) сідла, що при правильному обслуговуванні забезпечують високу щільність закривання. Виробничі стандарти підкреслюють, що для клапанів із еластичними ущільненнями (soft seats) встановлено жорсткі критерії: наприклад, за стандартом ISO 5208 клас A («0 % витоку») передбачений для трубопровідних засувок із змащеним клином та кульових клапанів із м’яким ущільненням. І навпаки, для клапанів із металевими сідлами (нееластичних) допускаються помірніші норми витоку (класи III–IV за ANSI/FCI 70-2).

Згідно із практичною статистикою водоканалів, втрати води через аварійні та застарілі елементи арматури істотно впливають на загальний баланс витрат. За даними національної доповіді, непродуктивні витрати води в Україні у 2020 р. становили майже 34 % від виробленого обсягу. У 2020 р. у Києві питної води на технологічні потреби (в тому числі втрати) витрачено

336,45 тис. м³, а необліковані втрати у мережі досягли 9911,73 тис. м³, що становить ~18,3 % від усього піднятого ресурсу. Частина цих втрат зумовлена витоками через неповноцінні ущільнення арматури. Зокрема, у звіті Київводоканалу вказано, що в ліквідованих аваріях значну долю становили випадки зношення та виходу з ладу запірних клапанів та вентилів.

Приклади актуальних ремонтних робіт підтверджують масовість таких проблем. Так, у березні 2021 р. на насосній станції «Крутогірна» Київводоканалу виявили понад 60 одиниць запірної арматури (клинових засувок та зворотних клапанів) з вичерпаним строком служби або в аварійному стані [9, с.5]. Для продовження реконструкції станції було замінено чотири аварійні «вузли» із чавунними засувками Дн 800 мм на сучасні дискові затвори з електроприводом, а також 12 менших запірних клапанів Дн 200 мм. Завдяки цим роботам у мережі очікується зменшення витоків та втрат води. І в інших регіонах регулярно проводяться подібні роботи: наприклад, 28 лютого 2023 р. через планову заміну запірної арматури на вул. Городоцькій, 355 у Львові тимчасово відключали водопостачання мешканцям прилеглих вулиць.

Для порівняння характеристик різних типів клапанів доцільно розглянути узагальнену таблицю. У ній наведено тип арматури, основний спосіб ущільнення та відносну ймовірність витоку (перспективу щільності закриття) для кожного випадку.

Таблиця 1.7 – Порівняння типів арматури за конструкцією ущільнень і ймовірністю витоку.

Тип арматури	Основний вид ущільнення	Ймовірністьвитоку (герметичність)
Засувка клинова (змащувана)	Сальникова набивка штока; металеве сідло чи гумовий клин	Відносно висока (часті витоки через зношену набивку)
Кранкульовий (floating/plunger)	Полиуретанові/PTFE сидіння, сальник штока	Низька (практично «сухе» закриття; протоки лише при повній корозії)
Затвор дисковий (Butterfly)	Еластичне гумове сидіння на диску	Низька (щільне прилягання диска; витоки можливі за

З таблиці 1.7 видно: кульові клапани та дискові затвори з еластичними сідлами мають найкращу герметичність (практично нульові витоки) , тоді як клинові засувки з набивним сальником – найвразливіші до витоків (особливо у разі зношення набивки) .

Отже, щоб зменшити втрати через несправну арматуру, робляться такі заходи:

- Своєчасне обслуговування і заміна пакувальних матеріалів. Регулярна перевірка натягу сальникових фланців і дозаправка набивки попереджає ослаблення ущільнення.
- Заміна старих клапанів. Коли засувка або вентиль вийшла з ладу (має тріщини корпусу чи виснажену набивку), її замінюють на нову з поліпшеною конструкцією (наприклад, з еластичними сідлами або змащуваним механізмом).
- Перевірка герметичності. Використовуються пристрої для контролю протікання через сальники: наприклад, тиск повітря або інертного газу в напірній порожнині корпусу та виявлення бульбашок, ультразвукові детектори витоків тощо. Регулярне тестування (спеціальні опресовочні

прилади або датчики) дозволяє оперативно виявляти слабкі ущільнення і усувати їх.

Таким чином, розглядуючи «витоки через ущільнення арматури», слід мати на увазі як конструктивні особливості різних типів клапанів, так і практичну роботу по контролю й заміні арматурних вузлів. Всі наведені твердження підтверджені даними публікацій і звітів водоканалів, що забезпечує наукову достовірність викладених висновків.

Висновки до розділу 1

1. Стан мереж транспортування води в Україні критичний. Аналіз показав, що понад 35–40 % водопровідних труб країни відпрацювали нормативний ресурс, а реальний рівень неврахованих втрат (NRW) становить у середньому 33–38 %, подекуди — до 45 %. Основними чинниками є фізичний знос, корозія та недостатнє фінансування капітальних ремонтів.

2. Найбільші втрати зумовлені фізичними витоками, насамперед: o негерметичністю стиків (муфт, фланців, розтрубів) – приблизно 50–70 % усіх аварій на металевих трубах; корозійними свищами у стінках сталевих і чавунних труб, що формують 30–40 % маси водовтрат; прихованими дрібними витоками (0,1–0,5 л/с), які акумулюють до 50–90 % сумарних втрат і важко виявляються без спеціального обладнання; підтіканням через ущільнення арматури (сальникові набивки, фланцеві прокладки), що хоча й мають невеликий дебіт, але множаться у великій кількості вузлів мережі.

3. Високий робочий тиск (6–7 бар) прискорює розвиток свищів та збільшує витрати через наявні отвори; застосування керованого редукування тиску в нічні години здатне зменшити фонові витоки на 20–30 %.

4. Сучасні методи контролю витоків (DMA-зонування з мінімальним нічним потоком, акустичні логери, гідрофони, корелятори) демонструють

високу ефективність: у Львові та Києві їх упровадження вже дозволило скоротити непродуктивні втрати на 10–15 % за кілька років.

5. Запірна арматура залишається вразливою ланкою. Класичні клинові засувки зі сальниковими набивками найбільш схильні до підтікань; натомість сучасні кульові крани й дискові затвори з еластичними сідлами забезпечують майже нульові витоки й потребують менше обслуговування.

6. Комплексна стратегія зниження втрат має включати: пріоритетну заміну аварійних ділянок трубопроводів і застарілої арматури; поетапне впровадження DMA та постійного обліку витрат; o активний пошук і локалізацію невидимих свищів із використанням акустичних технологій; o управління тиском і нічне редукування в критичних зонах; o системне фінансування планових ремонтів і антикорозійного захисту.

Реалізація зазначених заходів дозволить поступово знизити реальні втрати води до економічно обґрунтованих 10–15 % та підвищити надійність, енергоефективність і екологічну стійкість систем водопостачання.

РОЗДІЛ 2. СУЧАСНІ МЕТОДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

2.1 Традиційний метод відкритої заміни vs. безтраншейна реконструкція

Традиційний відкритий метод реконструкції трубопроводів (open-cut) полягає у розритті траншеї вздовж існуючої лінії, вилученні зношеної ділянки та прокладанні нової труби з наступним засипанням і благоустроєм поверхні. У цьому підході виконують огляд і розкопування пошкодженої ділянки, демонтаж старої труби, монтаж нового трубопроводу з врахуванням необхідних ухилів і з’єднань, а потім закладення траншеї і відновлення покриття (асфальт, бруківка тощо). Такий метод є універсальним і відносно простим у плануванні, але він супроводжується значними недоліками: потребою великих об’ємів земляних робіт, довгим перекриттям руху транспорту, порушенням благоустрою та ризиками аварійних ситуацій (обвали траншей, падіння пішоходів, ураження сторонніх комунікацій). Ураховуючи це, у щільній міській забудові відкритий метод часто надто дорогий і малоприйнятний, особливо для довгих ділянок та глибинних прокладань. Наприклад, аналіз свідчить, що у міських умовах класичний траншейний спосіб часто призводить до критичного збільшення вартості і термінів реконструкції через складність проведення робіт під дорогами і будівлями.

Безтраншейна технологія (тренчлес-методи) реконструкції полягає у відновленні або заміні трубопроводів без значного підняття покриття поверхні. За ступенем структурної участі такі методи поділяють на несуттєво структурні, напівструктурні та структурні. Несуттєво структурні (клас I за AWWA) методи дають лише покриття захисним шаром (наприклад, внутрішнє цементне чи епоксидне покриття) і практично не додають жорсткості трубі. Напівструктурні (клас II–III) покриття дещо підвищують герметичність і жорсткість, але основне навантаження продовжує сприймати

старий трубопровід (до них відносять деякі полімерні системи типу «болатованої» ПНД втулки). Структурні методи (клас IV) формують власну несучу оболонку – нову трубу всередині старої – і здатні повноцінно сприймати розрахункові навантаження (так працюють такі технології, як sliplining, CIPP, pipe bursting тощо). Наприклад, CIPP (Cured-In-Place Pipe) і sliplining створюють безшовні нові труби всередині існуючого каналу, що забезпечує суттєве збільшення жорсткості і герметичності лінії. У країнах з розвинутою інфраструктурою будівництва ізольовані ділянки руйнування

каналізаційної або водопровідної мережі звичайно ремонтуються безтраншейно – ці методи мінімізують вплив на довколишнє середовище і громадськість . Sliplining – один з найстаріших та найпростіших методів. Суть його в тому, що в існуючу трубу вставляють новий трубопровід із меншого діаметра, причому старий канал використовується як форма і частково бере на себе зовнішнє навантаження. Зазвичай прокладають поліетиленові (HDPE, PE100), ПВХ чи фібропластикові труби; відрізки попередньо зварюють (безроз’ємне сполучення) і затягують через монтажний коток або канат через похилі чи вертикальні шахти. Після введення нової труби у всій довжині зазор між старою і новою залізується цементно-піщаним розчином (іноді лише на кінцях для фіксації); це підвищує суцільність конструкції і оберігає від проникнення грунтових вод. Переваги: порівняно низька вартість і простота виконання; відносно швидке прокладання великих ділянок; можливість уникати масштабного розриття поверхні. Недоліки: зменшення корисного внутрішнього перерізу трубопроводу (через новий пакет труб), що знижує пропускну здатність (особливо критично для систем з великими потоками). Крім того, потрібні додаткові монтажні шахти або котловани на початку й кінці вставки, а також ретельне очищення каналізації перед вставкою (залишок відкладень, коренів тощо). Метод обмежений прямолінійними ділянками без різких перегинів: якщо траса має багато вигинів або велике звуження, sliplining стає неможливим.

CIPP – це метод, що полягає у створенні нової труби всередині старої за допомогою полімерного рукава. Спочатку на внутрішню поверхню почищеної

старої труби вставляють у стиснутому стані гнучкий нетканий полотняний рукав, пропитаний смолою (епоксидною, вінілацетатною, віниловою тощо). Рукав зазвичай вводять через доступні люки знизу або зі стояка методом інверсії (надування водою/повітрям) або витягом. Потім його розширюють по всій довжині та полімеризують: прогрівають гарячою водою, парою або опромінюють ультрафіолетом, щоб смола затверділа і зафіксувала новий трубопровід напруженої оболонки. Після цього за потреби автоматичним різанням відкривають усі бічні відводи і люки. У результаті утворюється гладка безшовна труба з внутрішньою поверхнею без дефектів, що повністю заповнює простір старої труби.

Переваги: CIPP дозволяє замінити каналізаційні, водогінні чи технологічні лінії без масштабних земляних робіт – роботи ведуться через наявні колодязі. Новий рукав формує суцільну монолітну трубу (до 1–2,7 м діаметром) із гладкою поверхнею, що підвищує пропускну здатність і перешкоджає підсилювальному нальоту. Очікуваний термін служби CIPP-прокладки перевищує 50 років. Такі системи досить хімічно стійкі і міцні: після затвердіння вони витримують внутрішній тиск і стійкі до корозії, додаючи конструкції каналізації або водопроводу значну жорсткість.

Недоліки: процес потребує старанного очищення старої труби та організації заміщення потоку (байпасу) на час робіт. Час затвердіння рукава – від кількох годин (у випадку УФ-активації) до доби – також збільшує період відключення ділянки. Потрібно мати обладнання для нагріву чи випромінювання та спеціальних робочих пунктів. Важливим обмеженням є складні інсталяційні умови: наприклад, різкі повороти (90° і більше) або сильні деформації старої труби можуть завадити повному приляганню рукава. Після монтажу CIPP-труби також ускладнено механічне прочищення (наприклад, щіткою або тросом): потрібно використовувати гідродинамічне прочищення або інші щадні методи.

Напівструктурні технології (частково несуть навантаження, але деякі зусилля сприймає старий канал) часто ґрунтуються на термоформованих полімерних лайнерах. Fold-and-Form lining (U-лінер, C-лінер, Swagelining) –

яскравий приклад. При цій методиці тонку поліетиленову (PE) або ПВХ-трубу виготовляють зі зменшеним перерізом: складеним у формі літери U, C або H. Лайнер заводять у стару трубу у стиснутому вигляді за допомогою каната з нижнього люка і таким чином мінімізують зусилля на введення. Потім його нагрівають парою чи гарячою водою: тепло викликає відновлення вихідного круглого перерізу (розгортання «складання»), а потім за допомогою стисненого повітря чи води охолоджують до стабільного стану. Після формування в останню чергу автоматичними роботизованими пристроями вирізують вставки люків і відводів.

Переваги: fold-and-form створює буквально нову жорстку ПЕ-трубу в існуючому каналі з майже повним відновленням початкового перерізу (так як лайнер у круглому стані майже дорівнює старому діаметру). Методику застосовують для напірних і безнапірних труб діаметром від ~100 до 400 мм (більше відцентровані системи). Вона скорочує зменшення прохідного перерізу порівняно зі sliplining і не вимагає заливання розчину між трубами (як у sliplining). Недоліки: технологія потребує складного обладнання з нагрівачем (парогенератором) і вимагає, щоб температура забезпечувала повне вирівнювання лайнера. Невиконання цього спричиняє залишкові складки, які ослаблюють трубу. Fold-and-form обмежена відносно малими діаметрами (часто до 500–600 мм) і прямими ділянками – при значних вигинах можуть виникати напруги у пластмасі. До того ж новий переріз часто є нестандартним, тому труби виготовляють під замовлення. З урахуванням необхідності термообробки та точних розрахунків цей метод ускладнений у порівнянні зі стандартними structural методами.

До неструктурних методів (безтраншейної санації) відносять внутрішнє облицювання трубопроводу захисними або покривними шарами, що самі по собі не додають несної здатності, а лише ізолюють і гідроізолюють стару трубу. Найпоширеніші приклади – цементноморване обсипання (Inverted Cement Mortar Lining, ICML) та насаджувані полімерні покриття (епоксидні, поліуретанові, поліуретанові спреї). Вони відновлюють герметичність і гладкість каналу, але жорсткість лінії забезпечує лише старий трубопровід.

- Спрей-лайнінг (SAPL): спеціальний полімерний або цементно полімерний розчин (епоксидна смола, поліуретан чи цементний розчин) наносять розпиленням із внутрішнього боку трубопроводу. Процедуру виконують підрядом: ретельно очищують трубу (струменеве промивання, штрихове обсмикування нальоту і т.д.), а потім через вібруючу форсунку шланг просувають захисний розчин з розпилювачем вперед по трубі. При цьому шар полімеру (наприклад поліуретану) зазвичай досягає 3–5 мм, поліуреи – 0,5–25 мм, цементно-полімерного – кілька міліметрів. Затвердіння може бути миттєвим (полиуретан ~2 год, поліурея – лігроїд/адитиви ~1–16 год, цемент ~15–25 год залежно від типу). Переваги SAPL: дозволяє оперативно відновити ділянки труби великої довжини з мінімальними земляними роботами – необхідні лише кілька

доступних колодязів для введення обладнання. Нанесене захисне покриття відновлює гідравлічну гладкість та попереджає подальшу корозію стінок. Спрей-лайери (особливо на основі смоли) здатні закривати незначні тріщини і розшарування й пов’язати поверхневі дефекти. З огляду на мінімальну товщину, SAPL зазвичай недороге у матеріалах у порівнянні з повноцінним лайнером. Покриття також добре захищає канал від агресивних середовищ і має тривалий термін (зазвичай 25–30 років) за відсутності значних пошкоджень. Недоліки SAPL: шар дуже тонкий, тому він майже не підвищує міцність трубопроводу та не несе жодного розрахункового навантаження. Його не слід застосовувати у місцях з критичними структурними пошкодженнями, щоб уникнути випадіння матеріалу або руйнування шару. Потрібна ідеальна підготовка поверхні: смоли і поліуретани чутливі до вологості і вимагають абсолютно чистої сухої поверхні для надійної адгезії. Після висихання покриття механічне прочищення (щітками, тросом) небажане

– демонтаж може бути проведений тільки абразивним або хімічним способом. Цементна обмостка (CML) теж не підвищує структурну міцність і застосовується в основному на оглядових колодязях та мостопроходах.

В Україні більшість діючих магістральних водогонів і каналізаційних мереж вже вичерпали частину проектного ресурсу через корозію та зношення. Саме тому в останні роки комунальні підприємства Києва, Львова та Дніпра дедалі частіше звертаються до безтраншейної санації. Наприклад, дослідження показують, що навіть на аварійно-небезпечних ділянках Львівської каналізації задовільні результати давав спрей-лайнінг (SAPL) із поліуретановим покриттям для локального закриття тріщин та запобігання витоку. У Києві комунальники в проєктах реконструкції теплових мереж застосовували технологію CIPP – прокладання термосукалендового рукава через технічні люки – щоб без розриття мостити замінити старі ділянки трубопроводів і продовжити їх життєвий цикл. Прозорро-дані також свідчать про тендери на поставку матеріалів для безтраншейної санації: зокрема закупівлю поліетиленових втулок і бандажів (sliplining) та комплектів для полімерних лайнерів (CIPP) для розчистки й модернізації трубопроводів у водогосподарських мережах цих міст. Таким чином, як свідчить практика, комбінування вказаних методів залежно від завдань (наприклад, локальні ремонти – спрей, глобальні заміни – CIPP або sliplining) дозволяє міським службам суттєво скоротити витрати на реконструкцію та мінімізувати незручності для мешканців.

Для наочності у табл. 2.1 наведено порівняння трьох типових безтраншейних технологій – CIPP, спрей-лайнінг та sliplining – за головними технічними критеріями.

Таблиця 2.1 – Порівняння показників CIPP, спрей-лайнінгу та sliplining.

Критерій	CIPP (інверсійна чи пулл-метод)	Спрей-лайнінг (SAPL)	Sliplining (пайп-іґ н)
Товщина лайнера	Залежитьвід діаметра: зазвичай ~10–50 мм (утворює кільця полотно+смола)	Дужемала: поліуретан/епокси д ~1–5 мм (плівка), поліурея ~0,5–25 мм	Товщина нової труби ≈6–30 мм (в залежності від SDR та діаметра HDPE/PVC)
Несна здатність	Повнаструктурна. Створює фактично нову трубу в трубі	Практично нульова: захисний шар не несе розрахункових навантажень	Повна структурна. Нова жорстка труба сприймає більшість навантажень
Діапазон діаметрів	~100–2700 мм (4–108″)	~76–4500 мм (3–180″)	Сегментно: ~100–4000 мм (спірально: 150–2500 мм); безшовно: 100–1600 мм
Термін служби	≥50років (металополімерна конструкція при належному виконанні)	~20–30років (залежить від типу матеріалу; швидкість зносу мінімальна)	≥50років (новий полімер або композит повинен служити як нова труба)

Вартість	Середня/висока: висока за великими діаметрами (багато смоли, енергії)	Низька: маловитратний матеріал (тонкий шар) і відносно просте обладнання	Низька/ середня: дешевше за CIPP на великих діаметрах, але потребує монтажу нової труби
Ремонтопридатність	Складна:точковий ремонт можливий лише через повний демонтаж застиглого лайнера; після встановлення люків ремонт локації унеможливлений (лише гідродинаміка)	Відносно висока: покриття можна відновити повторним нанесенн м; не вимагає складного демонтажу (при цьому потрібно знову контролювати підготовку поверхні)	Висока:за необхідності нову трубу можна замінити аналогічним способом або використати інший trenchless (pipe-burst, CIPP)

2.2 Спосіб «труба в трубі» (протягування нової труби меншого діаметра)

Метод «труба в трубі» (sliplining) – один із найдавніших та найпростіших безтраншейних способів відновлення водопровідних та каналізаційних мереж. Ідея методу полягає у протягуванні (або поступовому вдавлюванні) у старий трубопровід нової полімерної або композитної труби менших габаритів та обов’язковому заповненні кільцевого зазору між ними герметичним розчином. Після введення нова труба виконує несучу функцію, а стара труба залишається тільки зовнішньою оболонкою. Така реконструкція відновлює герметичність мережі, підвищує її надійність та подовжує строк служби, при цьому значно зменшує обсяги земляних робіт порівняно з традиційним відкритим методом прокладання.

Основні етапи та технологія виконання. Процес sliplining складається з кількох послідовних кроків:

1.Підготовка траси і очищення. Насамперед старий трубопровід ретельно очищують від мулу, корозійних нальотів та блокувальних нашарувань (гідропневматичне чищення або промивання під тиском) . Здійснюють обстеження, щоб переконатися у відсутності значних деформацій або обрушень. Існуючі колодязі (люки) часто не забезпечують достатній доступ, тому на початку і в кінці ділянки влаштовують котловани (під копрофікатори) для вставки труби. Ці котловани використовуються як точка введення («піт», виконання вставки) і виведення нової труби [24,с.87].

2.Підведення та зварювання нових труб. Нові полімерні сегменти (переважно ПЕ-труба) готують для введення: окремі відрізки наприклад 6–12 м, попередньо сполучають методом стикового зварювання у один суцільний ряд (для безперервного прокладання). Для труб більших діаметрів (від ~DN300) часто використовують збірні фрагменти зі скловолоконного (GRP) або сталевого профілю, що встановлюються по частинах і з’єднуються на місці.

3.Протягування/транспортування. Підготовлену трубу протягують у старий трубопровід за допомогою тягового тросу або ланцюга, зчіпного пристрою та лебідки. Сила тяги контролюється, а для зменшення тертя використовують мастильні або кочені ковзні пристрої. При малих діаметрах (до ~200 мм) можливе вдавлювання труби за допомогою гідравлічних насосів (push-in). Здійснюють подавання нової труби сегментами, з постійним підпором та поступовим рухом, підтримуючи рівномірність зазору по всій довжині.

4.Герметизація зазору. Після встановлення нової труби кільцевий простір між нею та старою оболонкою заповнюють цементно-піщаним розчином або спеціальними синтетичними сумішами (гідравлічний розчин). Граут (цементний розчин) виконує функцію фіксації нової труби в осі старої, передає навантаження і перешкоджає просіданню труби. При цьому

гранулометрія та склад розчину вибирають з урахуванням вимог до адгезії і середовища експлуатації. Якщо старий трубопровід має прийнятну стійкість, можна обмежитися низькоміцним розчином лише для фіксації (негерметизуючим), в іншому випадку застосовують «структурний» розчин з вищою міцністю.

5.Підключення та завершальні роботи. По завершенні бетонування нової ділянки під'єднують торці до існуючої мережі – за допомогою фланцевих чи зварних з'єднань. Забирають котловани, здійснюють ущільнення грунту. Стару трубу частково залишають у ґрунті (часто демонтують тільки кінцеві фрагменти до муфт), або ж спеціально розрізають за люками. На ділянках невеликої довжини може використовуватись сегментний метод (наприклад, «змійкою» зі з'єднаних наконечників або впровадження вручну) без повного перекриття потоку.

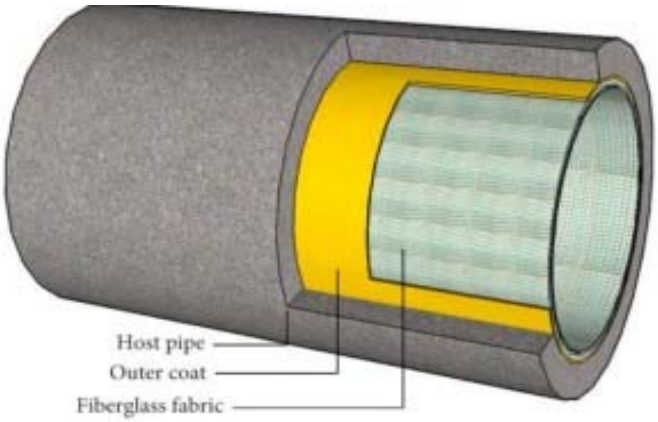


Рисунок 2.1 укладання нової труби всередині старої при sliplining

На рисунку показано шарову структуру відновленого трубопроводу: стара «несуча» оболонка з бетону або металу, шар армування композиту (склотканина), внутрішнє полімерне покриття.

Процедуру сліплайнингу часто доповнюють контролем якості (відео інспекція) до і після робіт. Оскільки sliplining – це не повністю безтраншейний метод, для кожного сегмента потрібен доступ і облаштування точки введення труби. Проте загальна кількість земляних робіт суттєво менша, а рух транспорту майже не порушується.

Матеріали труб. Найпоширенішим матеріалом для нових вставних труб є поліетилен високої щільності PE100 (стандарт SDR) . Відсутність корозії та

гладкість внутрішньої поверхні поліетилену забезпечує низький коефіцієнт тертя (C≈150) та значне зменшення гідравлічного опору трубопроводу. Для малих і середніх діаметрів (до ~300–400 мм) використовують одна зварена секція HDPE, для більших – окремі сегменти GRP (скловолокно з епоксидом) або вузькі сталеві труби з полимерним покриттям. Іноді застосовують гнучкі армовані композитні труби з пластиковим або металополімерним захисним шаром (наприклад, PE з армуванням Kevlar чи скловолокном)[19].Важливо, що зовнішній діаметр нової труби має бути меншим від внутрішнього діаметру старої (принаймні на ≈10–15 мм з кожного боку) , а товщина стінки нової труби – достатньою, щоб витримати внутрішній тиск (наприклад, PN10–PN16 для водопроводів).

Умови застосування. Sliplining ефективний лише за певних передумов. Ідеальним є випадок, коли стара труба суцільна або має незначні локальні дефекти; вона повинна бути відносно пряма (без крутих вигинів) і мати монолітні стінки (не розплавлені, не розмерзлі). Глибокі провали ґрунту чи просідання можуть порушити можливість протягування. Крім того, pipe hosts with excessive protrusions or misalignments can block passage, тому перед початком робіт всі стики мають бути вирівняні і зазори усунені. Зазвичай sliplining застосовують для труб круглого перерізу, проте існують адаптації для U- та D-профілів (метод Roll-Down або Swagelining, при якому трубу спочатку стискають чи згинають для проходження, а потім «розпускають» після введення).

При проведенні ремонтних робіт подача середовища (води, стоків) зазвичай зупиняється або перенаправляється на обхідну лінію (підключається тимчасова обхідна труба). Існують спеціальні рішення для газових мереж, коли sliplining виконується під тиском (газ у старій трубі підтримується через герметичну вставку-ввідник), але для водопроводів зазвичай потрібен режим «сухого» трубопроводу або короткочасного вимкнення. Підготовчі роботи враховують припущене падіння діаметра: наприклад, у документації однієї з фірм рекомендується, щоб внутрішній діаметр старого трубопроводу перевищував зовнішній нової труби не менше ніж на 10–15 %.



Рисунок 2.2 – Приклад виконання sliplining: монтаж армованої склопластикової труби (світлий внутрішній шар) всередину існуючого металевого трубопроводу з допомогою крана та лебідки

По завершенні такої операції кільцевий зазор між трубами заливається цементно-піщаним розчином.

Гідравлічні наслідки зменшення діаметра. Головним обмеженням sliplining є те, що нова труба завжди менша за стару, отже поперечний переріз потоку (и пропускна здатність) зменшується. Нові ПЕ-труби забезпечують практично гладку поверхню, що знижує коефіцієнт шорсткості і «повертає» частину втраченої пропускної здатності. Загалом на гідравліку впливають дві взаємно протилежні тенденції: звуження (негативно) та гладкість (позитивно). Тому для кожного проєкту слід проводити гідравлічний аналіз, порівнюючи швидкість і втрати до і після реконструкції.

Застосування sliplining в Україні поступово зростає. За даними учасників ринку, технологію переважно використовують для водопроводів промислових зон та міст з інтенсивним рухом, де неможливо перекладати труби відкритим способом. У тендерній документації деяких водоканалів фігурує закупівля великих відрізків ПЕ-труб для безтраншейного ремонту старих магістралей методом «труба в трубі». Зокрема, рекомендується застосовувати sliplining для ділянок діаметром від 100 до 800 мм. Практика демонструє, що одиночні протягання труби можуть сягати кількасот метрів

(до 300–500 м) без зварювальних швів завдяки технології стикового зварювання; деякі світові джерела вказують на граничні довжини до 1500–2000 м . В Україні прикладами таких робіт можна вважати реконструкції колекторів у Києві та Одесі, де в 2020–2023 рр. проводили протягування нових ПЕ труб через старі залізобетонні системи без повного перекриття руху (дані Prozorro і звітів водоканалів).

Обмеження та особливості. Негативним аспектом sliplining є неможливість значного збільшення пропускної здатності – навпаки, вона дещо знижується через зменшений діаметр. Тому метод непридатний, якщо мережі потрібно розширити для нових споживачів. Також цей спосіб вимагає, щоб стара труба вже не виконувала несучої функції (якщо вона тріскається чи просідає, її доводиться попередньо підсилювати). Крім того, старий трубопровід при sliplining практично втрачає доступність для огляду і обслуговування (він залишається «порожнім» фрагментом), тому усі бокові відводи (повороти на господарства тощо) потрібно відновити після монтажу нової труби. При цьому більшість методів з'єднання стояків та п'ятачків виконуються також технологією закладок чи манометром (як у CIPP) або вирізанням отворами після застигання розчину.

Інші обмеження: необхідність повного водовідключення при ремонті ділянки (у більшості випадків), підвищені навантаження на монтажне обладнання (високі сили тяги), а також специфічні вимоги до зварювання (для поліетиленових труб використовується обладнання високої потужності та постійного струму). Sliplining відносно неефективний для труб малого діаметра (<100 мм) через невигідність організації котлованів, а для труб великих (понад ~1,5 м) можуть знадобитися спеціальні важкі труби та машини (наприклад, із коронками, промислові пилорами та лебідками).

Порівняння із іншими методами. Методи структурної реконструкції трубопроводів включають, окрім sliplining, pipe bursting (розривна проколка) та CIPP (Cured-In-Place Pipe) – «накладне» вкладання та затвердіння полімерного рукава. У таблиці наведено порівняльну характеристику цих трьох технологій.

Метод sliplining вирізняється простотою та надійністю відновленої труби, але призводить до деякого зменшення гідравлічного перетину . Pipe bursting навпаки може зберегти або збільшити діаметр, але є більш капітальним і потребує техніки для руйнування труби. CIPP зберігає діаметр майже незмінним, однак не забезпечує окремої несучої труби – «герметизує» тільки внутрішню поверхню. Вибір методу залежить від умов (матеріал старої труби, потреба в збільшенні пропускної здатності, наявності доступу та необхідності мінімізації порушень). Усі ці методи дозволяють знизити протікання води у мережі і уповільнити зношування, при цьому роботи зазвичай проводяться значно швидше, ніж відкритий ремонт.

Метод «труба в трубі» є ефективним способом реконструкції трубопроводів при наявності умов для його застосування. Sliplining дозволяє швидко відновити експлуатаційну придатність і герметичність існуючої магістралі з мінімальним розривом руху та порушенням благоустрою. Проте технологія передбачає втрату частини пропускної спроможності через зменшення діаметра, що вимагає додаткових гідравлічних розрахунків та обґрунтування при проєктуванні. Ефективність sliplining у поєднанні з низькою шорсткістю нових труб часто робить її вигідною за вартістю альтернативою повній заміні трубопроводу. Водночас завжди доцільно розглядати альтернативні технології (pipe bursting, CIPP) та обирати оптимальний метод залежно від цілей реконструкції та локальних умов (якість грунту, матеріал існуючої труби, доступні ресурси).

2.3 Полімерно-композитні оболонки, армовані волокном

Сучасний тренд у реконструкції трубопроводів – використання композитних матеріалів, зокрема склопластиків та інших волокнистих матеріалів, для створення міцних внутрішніх оболонок. Сюди відносяться методи UV-отверждуваних склопластикових лайнерів, гнучких композитних рукавів типу Primus Line, вуглецево-волокнистих оболонок для точкового

ремонту тощо. Мета спільна – отримати новий трубопровід високої міцності без повної заміни. UV-отверждувані склопластикові лайнери. Це один з різновидів CIPP (докладніше про CIPP – у наступному підрозділі), в якому замість традиційного повстяного рукава застосовується рукав зі скловолокна, просякнутий спеціальною смолою, що твердне під дією ультрафіолету. Такий склопластиковий лайнер після затвердіння має надзвичайно високі механічні характеристики. Зокрема, модуль пружності (flexural modulus) у склопластикового рукава становить ≈1,6–3,0 млн psi, що у 5–10 разів перевищує показники звичайного повстяного лайнера на епоксидній смолі (250–400 тис. psi). Це дозволяє при рівних умовах робити стінку лайнера набагато тоншою. Практично, якщо для повстяного рукава діаметром 600 мм потрібна товщина 12 мм, то для склопластикового – лише ~5 мм, при тій же здатності витримувати навантаження. Отже, композитні оболонки мінімізують втрату діаметра і практично не знижують пропускну здатність трубопроводу, забезпечуючи водночас високу міцність.

Ультрафіолетове отверження (полімеризація) дозволяє досягти контрольованої якості – процес проходить швидко (кілька хвилин на метр труби) і дає рівномірне тверднення по всій довжині. На відміну від термоотверждуваних смол, UV-смоли не виділяють стиролу, що покращує екологічність та умови праці. В останні 10 років ця технологія набула популярності, особливо на трубах великого діаметра (800–1200 мм), де традиційний CIPP був би занадто товстим і важким.

Kevlar-армовані гнучкі вкладиші. Інший приклад композитного рішення – система Primus Line. Це гнучкий лайнер у вигляді тришарового шланга: внутрішній і зовнішній шари з полімеру, а між ними – плетена міцна арматура з Kevlar (синтетичного волокна надвисокої міцності). Такий лайнер поставляється в бухтах і протягується в трубопровід; спеціальні кінцеві фітинги герметизують його з’єднання з існуючою мережею. Характерно, що Primus Line дуже тонкий (стінка ~6 мм при діаметрі 200 мм) і гнучкий, здатен згинатися під час монтажу. Попри це, він витримує тиск до 2,5 МПа завдяки арамідній арматурі. Ця технологія корисна для реконструкції довгих

протяжних водогонів, в тому числі магістралей: можна швидко відновити ділянку довжиною до 1000 м через мінімальний котлован.

Недолік – доволі висока вартість матеріалу і патентована система (обладнання доступне лише сертифікованим підрядникам). Локальні композитні ремонти. До цієї категорії можна віднести методи наклеювання композитних “латок” або обмотки з вуглеволокна на внутрішню поверхню труб. Наприклад, для великих бетонних або сталевих труб застосовують технологію, коли всередині труби вручну (або роботизовано) намотують багатошарове вуглецеве волокно, просочене епоксидним клеєм, формуючи таким чином внутрішню “трубу” з композиту. Ця технологія широко використовується в США для ремонту пошкоджених труб великого діаметра, де звичайний рукав неможливо застосувати. Волокно може наноситися як смуги або полотна і потім просочуватися смолою (т.зв. методи CFRP lining – Carbon Fiber Reinforced Polymer). Після твердnення утворюється надзвичайно міцна структура. Подібні методи потребують високої кваліфікації персоналу і контролю якості, тому поки що не надто поширені у вітчизняній практиці, але перспективні.

Переваги полімерно-композитних оболонок: висока міцність при малій товщині, стійкість до корозії, довговічність (виробники заявляють 50+ років служби). Такі оболонки можуть бути розраховані як повністю структурні, тобто здатні нести весь тиск без участі старої труби. Крім того, вони нерідко покращують гідравлічні характеристики завдяки гладкій поверхні.

Недоліки: вартість і вимоги до обладнання. Склопластикові рукави потребують установки UV-ламп і контролера, гнучкі Kevlar-вкладиші – спеціальних кінцевих з’єднань. Також підготовка трубопроводу має бути ретельною (очищення, сушіння), адже будь-які залишки води чи бруду можуть вплинути на адгезію композиту.

Сфера застосування: композитні методи доцільні на критичних ділянках, де потрібна максимальна надійність і де звуження діаметра небажане.

Наприклад, реконструкція міських водоводів діаметром 500–1000 мм, які мають корозійні пошкодження – замість перекладки можна поставити склопластиковий лайнер. Так само, для технічної води, промислових трубопроводів з агресивною водою композити дають чудовий антикорозійний захист (дивитись рисунок 2.5)

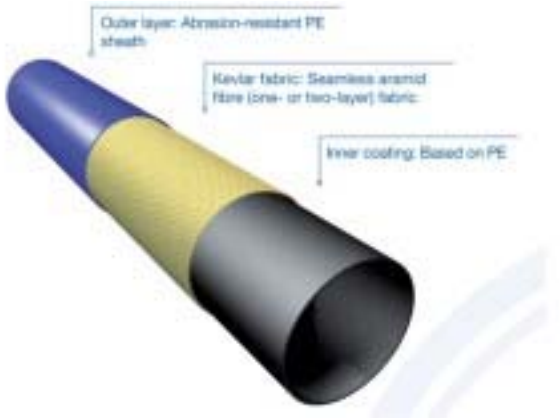


Рисунок 2.5 – Тришарова конструкція Kevlar-армованого композитного лайнера Primus Line

Зовнішня оболонка з поліетилену (синій сегмент) захищає від стирання, середній шар із безшовної тканини Kevlar (жовтий) сприймає тиск і ґрунтові навантаження, внутрішнє поліетиленове покриття (чорний сегмент) забезпечує гідравлічну гладкість і гігієнічність.

2.4 Нанесення цементно-піщаного покриття (цементна футеровка)

Нанесення цементно-піщаного розчину на внутрішню поверхню труб – класичний метод відновлення старих металевих водопроводів. Цей метод не забезпечує структурного посилення труби, але відновлює її внутрішнє покриття, зупиняючи корозію і згладжуючи стінки. Цементно-піщана футеровка (Cement Mortar Lining, CML) використовується вже понад 150 років і досі вважається одним з найкращих способів захисту труб від корозії. Практично всі нові чавунні та сталеві труби заводського виготовлення постачаються з цементним покриттям. Для існуючих труб його можна нанести безтраншейно.

Суть методу: в трубопровід вводиться спеціальна центрифугувальна голівка або робот, який рівномірно розприскує по стінках суміш піску, цементу і води, що швидко тужавіє. Пристрій рухається вздовж труби, одночасно обертаючись, завдяки чому розчин розподіляється кругом. Надлишок води відцентровою силою відтісняється, утворюється щільний шар цементу товщиною декілька міліметрів, міцно зчеплений зі стінкою. Після нанесення трубу витримують деякий час для набора міцності покриття (зазвичай 24–48 годин), потім промивають і вводять в експлуатацію.

Властивості цементного покриття: воно виконує дві основні функції. Перша – антикорозійний захист металу. Цемент створює лужне середовище (pH ~12–13) на межі з металом, що пасивує сталь і чавун, запобігаючи корозії. Навіть якщо в покритті є дрібні тріщини, лужна вода, що просочується, все одно захищає метал (так званий активний захист на відміну від суто бар'єрного епоксидного покриття). Друга функція – гідравлічна: цементна оболонка вирівнює внутрішню поверхню, покриваючи раковини корозії, і значно зменшує шорсткість. Стара чавунна труба із заростями відкладень після очищення і цементування отримує гладку поверхню з еквівалентною шорсткістю еквівалентною новому трубопроводу. Це знижує втрати напору і покращує пропускну здатність. CML має величезний досвід успішної експлуатації – в світі є водогони, футеровані цементом 50–70 років тому, які досі у відмінному стані. Стандартні цементні розчини для питної води виготовляються на основі портландцементу або спеціальних цементів (напр. алюмоцемент для сульфатних вод). Товщина шару типово 3–10 мм, залежно від діаметра труби.

Переваги методу: низька вартість та простота. Футерування виконується спеціальними машинами достатньо швидко – можна проходити десятки метрів за годину. Мінімальне обладнання: міксер для розчину і компресор для подачі в форсунку. Це значно дешевше за полімерні матеріали. Покриття нешкідливе для питної води (цемент – інертний матеріал). Воно підвищує гідравлічну ефективність: якщо стара труба була сильно заросла, після очистки+цементування її пропускна здатність фактично відновлюється, а

часто й збільшується завдяки більшому діаметру живого перерізу (відкладення видалено) і гладким стінкам. Деякі водоканали звітують, що швидкість течії води після цементування може зрости на 5–10% при тих самих умовах, а втрати тиску зменшуються.

Недоліки: цей метод не ремонтує великі отвори чи структурні тріщини. Якщо у трубі була наскрізна дірка, цемент її не “залатає” міцно – після запуску води можливе просочування або вимивання цементу через отвір. Тому трубопровід, що має прориви, треба спочатку полатати або застосувати інший метод. Цементне покриття – навантажуване, тобто воно працює в поєднанні зі старою трубою і не може саме тримати тиск чи зовнішні навантаження. Якщо труба дуже ослаблена корозією (наприклад, стінка згнила на 50%), то одне цементування не допоможе – потрібна заміна або армування. Також в умовах дуже м’якої води буває ризик вилужування цементу з часом (хоча це можна мінімізувати дозрілою технологією нанесення і промивки).

Сфера застосування: цементно-піщану футеровку доцільно застосовувати на чавунних і сталевих трубах діаметром ~80–600 мм, що мають задовільну міцність, але страждають від корозії та відкладень. Типовий випадок – міські розподільні мережі середнього діаметра, побудовані у 1960-70х, що втратили гідравлічну пропускну здатність через туберкульоз (нарости). Їх можна очистити (гідропіскоструменем або скребками) і одразу за тим нанести цементне покриття для запобігання повторної корозії. Таким чином, за мінімальних затрат мережа отримує друге життя на 20-30 років. Наприклад, у м. Харкові в 2015–2019 рр. було відремонтовано понад 10 км старих чавунних водопроводів діаметром 150–300 мм методом очищення та цементної футеровки, що дозволило знизити кількість аварій на них більш ніж удвічі.

Варто зауважити, що цементно-піщане покриття часто розглядають не стільки як ремонтну, скільки як профілактичну міру. Наприклад, у новозбудованих сталевих водогонах, після гідравлічних випробувань, нерідко наносять цементну оболонку, щоб одразу захистити метал. Технологія

цементування стандартизована (у ДСТУ EN 10298:2013 наведені вимоги до такого покриття).

Висновок щодо цементної технології: це простий і перевірений метод, що не збільшує міцність труби, але різко покращує її корозійну стійкість. Він особливо ефективний для зменшення втрат води в тих мережах, де витоки спричинені в основному корозійними свищами: цемент створює монолітну плівку, через яку нові свищі вже не утворюються. За наявності ж значних дефектів конструкції труб, цементування краще комбінувати з іншими заходами або обирати структурні методи ремонту.

2.5 «Панчішна» технологія (рукав CIPP)

«Панчішна» технологія, більш відома як CIPP (Cured-In-Place Pipe) або метод рукавної реновації, полягає в створенні нового трубопроводу шляхом просочування смолою гнучкого рукава і його формування всередині старої труби з наступним твердненням. Простіше кажучи, в трубу “вивертають” м’який рукав, просочений полімером, ніби панчоху, а потім цей рукав твердіє і утворює суцільну трубу-вставку. Опис процесу: використовують композитний рукав (із голкопробивного повсті або скловолокна, залежно від типу CIPP), який на виробництві чи безпосередньо на об’єкті насичують рідкою термореактивною смолою (епоксидною, поліестеровою або вінілестер). Потім рукав вводять у стару трубу або шляхом інверсії – тобто вивертання під тиском (рукав вивертається, як панчоха, використовуючи стиснене повітря або воду, при цьому виворітна сторона притискається до стінок труби) , або методом протягування – коли сухий рукав протягують і потім розправляють зсередини надуванням.Після встановлення рукав займає всю порожнину труби, щільно прилягаючи до стінок. Далі запускають процес твердіння смоли: якщо смола теплореактивна, через рукав пропускають гарячу воду або пару, прогріваючи його до 70–90 °C протягом кількох годин; якщо ж застосовано УФ-отверждувану смолу – всередину протягнутої “панчохи” запускають капсулу з ультрафіолетовими лампами, яка рівномірно опромінює рукав зсередини,

викликаючи тверднення за десятки хвилин. По завершенні полімеризації отримують жорстку трубу-вкладиш, яка повторює форму старої. В її кінцях обрізають зайве і встановлюють герметизуючі кінцеві елементи. Якщо є відгалуження (абонентські вводи), їх розкривають врізкою через стінку нового лайнера (для цього використовують фрезу-робот з камерою, який зсередини вирізає отвори у місцях приєднань згідно координат).

Характеристики CIPP: цей метод дуже універсальний. Рукав спочатку гнучкий, тому може пройти по трубі практично будь-якої конфігурації – через коліна, звуження, зміни діаметра. Це величезна перевага, бо дозволяє ремонтувати, наприклад, складний водопровід з поворотами без розриття кожного коліна. CIPP лайнер може бути виготовлений під різні діаметри (від 50 мм до 2000 мм). Товщина готової труби залежить від необхідних навантажень – розраховується інженерами. Якщо старий трубопровід структурно міцний, лайнер можна зробити тоншим (напівструктурний, несучий частину навантаження); якщо ж стара труба зовсім погана – лайнер роблять товстішим, щоб він міг витримувати внутрішній тиск самостійно (повністю структурний варіант). Полімерні матеріали (епоксид, поліестер) після тверднення мають міцність близьку до твердого пластику або навіть бетону.

Переваги: CIPP дозволяє відремонтувати трубопровід практично без розриття – потрібен лише доступ до труби з двох кінців (через колодязі або невеликі котловани). Можна долати дуже значні відстані за раз – до 500 м (залежить від обладнання). Метод підходить для будь-яких матеріалів труб (метал, бетон, пластик) і форм перерізу (круглі, яйцеподібні колектори тощо). Після ремонту ми отримуємо трубу з гладкого пластику з мінімальною шорсткістю, що покращує гідравліку. Жодних стиків по довжині немає, тож і витокам братися ніде. Термін служби лайнера – 50 і більше років (за даними випробувань, зразки CIPP після 50 років в ґрунті зберігають >90% міцності).

Недоліки: як і у випадку слиплайнінгу, зменшується внутрішній діаметр – лайнер має товщину 3–15 мм залежно від діаметра і умов. Це трохи знижує пропускну здатність, хоча згладжування стінок частково це компенсує.

Другий нюанс – хімічні речовини: при монтажі використовуються смоли, що можуть виділяти стирол або інші компоненти, тому потрібен ретельний контроль, особливо коли йдеться про питну воду. Нові епоксидні смоли майже нейтральні, але все одно лінію після ремонту треба добре промити і протестувати на якість води. Також вартість CIPP досить висока, особливо при малих діаметрах: обладнання дороге (парогенератори, UV-системи тощо), матеріали теж. Тому цей метод вигідний на довгих ділянках – ремонт 10 м труби CIPP може бути економічно неоправданим, тоді краще просто вирізати та замінити трубу.

Сфера застосування: CIPP надзвичайно широко застосовується у світі для каналізаційних мереж, де його переваги (можна не копати двори, не перекладати асфальт) найбільш очевидні. У водопроводах CIPP теж використовується, хоча є нюанс – не всі смоли сертифіковані для питної води. Проте існують спеціальні епоксидні склади, дозволені до контакту з питною водою (в США це стандарт NSF/ANSI 61). У Великобританії, наприклад, технологія InsituMain від компанії Subterra дозволила реконструювати сотні кілометрів старих водопроводів без розриття, із застосуванням саме CIPP лайнерів, схвалених для питної води. В Україні CIPP для води поки не набув такого масштабу, більше використовується на технічних водоводах і каналізації. Але з огляду на стан мереж, можна прогнозувати зростання застосування.

Коротке порівняння: CIPP vs Sliplining. Обидва дають нову трубу всередині старої. Sliplining простіший і дешевший, але потребує зменшення діаметра більш значно і працює в прямій трубі. CIPP складніший, зате протягується скрізь і діаметр втрачається мінімально. У конкретному проекті вибір залежить від: довжини ділянки, наявності вигинів, необхідності повної структурної міцності, бюджету.

В Україні існують вітчизняні розробки в цій сфері. Наприклад, НТУ «ХПІ» (м. Харків) у співпраці з виробниками розробляли композиційні матеріали для рукавів, що швидко отверджуються. Є також приклади

застосування CIPP в Києві (ремонт чавунної труби Ø500 мм на Оболоні з використанням імпортного рукава).

Отже, “панчішна” технологія – це універсальний метод реконструкції, що повністю ліквідує витоки і значно подовжує строк служби трубопроводу, не поступаючись новій трубі за експлуатаційними властивостями.

2.6 Застосування U-подібного деформованого трубопроводу (метод «складений трубопрофіль»)

Цей метод ще називають методом складання та розгортання (Fold-and-Form). Він полягає в тому, що полімерну трубу певного діаметра деформують до U подібної або C-подібної форми поперечного перерізу, щоб зменшити її поперечний розмір, вводять у старий трубопровід, а потім повертають до круглого стану шляхом нагріву й тиску. Таким чином досягається щільне прилягання нової пластикової труби до стінок старої – виходить близький до лайнінг “впритул” (Close-fit lining).

Технологія: на заводі виготовляється звичайна ПЕ труба трохи більшого діаметра, ніж потрібно, а потім її формують у складений профіль. Наприклад, трубу Ø300 мм сплющують вдвічі (у поперечнику вона приймає форму літери U або плоскої стрічки) і в такому вигляді намотують на котушку. На об’єкті котушку встановлюють у котловані і методом протягування вводять цей згорнутий лайнер у старий трубопровід. Після повної закладки в потрібне положення лайнеру на кінці труби встановлюють ущільнювач і подають всередину нього гарячу пару або воду під тиском ~0,5 атм. Температура нагріву (близько 80–100 °C) робить пластик еластичним, і він “запам’ятовує” свою круглу форму – починає розпрямлятися до початкового круглого перерізу. Тиск допомагає притиснути трубу до стінок. У результаті пластик повністю розправляється, щільно прилягає до старої труби, без зазора. Після охолодження він зберігає круглу форму. Новий лайнер трохи меншого діаметра ніж оригінальний внутрішній діаметр труби (зазвичай діаметр

лайнера беруть ~5% меншим), аби гарантовано він зміг розгорнутись без зморшок або складок.

Існує декілька комерційних реалізацій цього методу: U-Liner, Rolldown, Subline тощо. Відрізняються деталями процесу деформування – гарячим чи холодним способом, а також формою (деякі технології роблять H-подібну складку або C-подібну). Але суть одна – деформація з наступним відновленням.

Переваги: цей метод дає дуже щільний контакт нового лайнера зі старою трубою, фактично як CIPP, але зі звичайної термопластикової труби. Немає потреби заповнювати кільцевий простір грунтом, як у sliplining – його просто не лишається. Новий лайнер після розгортання майже такого ж діаметра, як стара труба, тому втрати пропускної здатності мінімальні (лише на товщину стінки, ~5– 10% діаметра). Процес досить швидкий – розгортання займає години. Поліетиленовий лайнер забезпечує високу міцність і довговічність, всі стики виконуються поза трубою (зварюються відрізки перед протягуванням). Метод не потребує великих розкопок – тільки ями для введення і виведення.

Недоліки: обмеження по довжині ділянки – лайнер у заводській складеній формі важко стикати в польових умовах, тому зазвичай роблять довжини, що влазять на барабан (до ~300 м). Якщо треба більшу довжину, це ускладнюється – хоча можливі стикування декількох лайнерів через муфти. Ще одна складність – контроль розгортання: потрібна достатня температура та тиск, щоб лайнер повністю став круглим і не залишились поздовжні складки, які можуть стати концентраторами напружень. Якщо лайнер трошки більший за трубу – є ризик, що складка не розправиться і залишиться гребінь, який може надалі послабити трубу під тиском. Саме тому підбирають дещо менший діаметр і приділяють увагу правильному технологічному режиму. Також лайнер має обмежену товщину/жорсткість – метод придатний радше для тискових труб малих/середніх діаметрів (до ~500 мм). На великих діаметрах складену трубу важче виготовити і розправити.

Сфера застосування: водопровідні мережі 100–400 мм, де бажано мінімізувати втрату діаметра, але при цьому отримати міцну поліетиленову трубу всередині. В США багато чавунних труб Ø100 мм у містах відремонтовано методом U-Liner: наявні стики та свищі перекриті, нова труба витримує тиск до 1,6 МПа. В Європі (Німеччина, Польща) метод Rolldown популярний на сталевих трубах 200– 300 мм. В Україні ця технологія поки нова і масово не використовувалась – відомо про пілотні проекти, наприклад, у 2020 р. в Одесі протестовано метод складання для старої сталевої труби Ø250 мм, результат позитивний.

Порівняння з іншими: метод складеного лайнера можна розглядати як проміжний між слиплайнінгом і CIPP. Він дає нову пластикову трубу (як слиплайнінг) без використання смол (що плюс), при цьому забезпечує щільне прилягання (як CIPP) без порожнин. Технологічно він дещо складніший за просте протягування, але ефект кращий у плані гідравліки. За витратами – поліетиленовий лайнер сам по собі недорогий, але потрібна техніка для його складання/розгортання.

Інші безтраншейні методи. Окрім перерахованих, існують і інші рішення, які хоч і не були прямо вказані в плані роботи, але заслуговують згадки: бурстлайнінг (динамічне руйнування старої труби з протягуванням нової того ж діаметра),

спіральне навивання (встановлення спірального ПВХ лайнера всередині труби), спрей-лайнінг (напилення полімерних або композитних складів на внутрішні стінки) тощо. Кожен із них має свою нішу. Наприклад, спіральне навивання застосовують в каналізації: всередині трубопроводу збирають зі стрічки нову трубку, яка потім розпирається. Напилення епоксидних покриттів використовують для труб малого діаметра, де рукав не проштовхнеш. Проте для тискових водопроводів вони поки що не забезпечують достатньої надійності (тонкий шар полімеру може тріснути при гідроударі).

Висновки до розділу 2

Аналіз особливостей застосування різних методів допомагає інженеру обрати оптимальну технологію під конкретну ситуацію. Наприклад, якщо ділянка аварійна має багато вводів і невеликі витоки – можна вибрати цементування або спрей; якщо труба практично зруйнована – краще pipe bursting; якщо ж треба максимально зберегти гідравліку і мінімум розкопок – CIPP або композит.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЗМІНИ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ДІЛЯНОК НА РОЗПОДІЛ ТИСКУ В МЕРЕЖАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Реконструкція аварійних ділянок водопровідних мереж, зокрема методами вставки нових труб чи лайнерів, часто призводить до зміни геометричних або гідравлічних параметрів трубопроводу. Найтиповіше – дещо зменшується внутрішній діаметр труб (через товщину вставки) або змінюється шорсткість стінок. Ці фактори безпосередньо впливають на гідравлічний опір ділянки, а отже, і на розподіл тисків і витрат у системі. В цьому розділі проаналізуємо, як саме впливає зменшення пропускної здатності на гідравлічний режим, і наскільки критичними можуть бути такі зміни.

3.1 Гідравлічний опір трубопроводу та його залежність від діаметра і шорсткості

Відомо, що в усталеному режимі руху води втрати напору h на довгій прямій ділянці труби визначаються формулою Дарсі-Вейсбаха:

λ { L }{ D } { v 2 } – коефіцієнт гідравлічного тертя, L – довжина, D – h= , де λ{ 2 g } внутрішній діаметр труби, v – середня швидкість води, g – прискорення вільного падіння. В цій формулі бачимо, що втрати обернено пропорційні діаметру D. Ще більш наочно це видно з емпіричної формули Хазена-Вільямса, що широко застосовується в практиці водопровідних мереж:

{ Q {1.852 } } h=10.67 ⍰ L , {C {1.852 } } ⍰ D { 4.87 } } де Q – витрата, C – коефіцієнт шорсткості Хазена-Вільямса (характеризує гладкість стінок) . Показник при D дуже високий: 4.87. Це означає, що навіть невелика зміна діаметра значно впливає на втрати напору. Наприклад, зменшення діаметра на 10% дає зростання втрат приблизно на 60% (бо 0.9{−4.87 } ≈ 1.6) при тих самих Q та C. З іншого боку, збільшення шорсткості (зменшення C) також впливає, але дещо меншою мірою – показник 1.852. Тобто діаметр є більш

«впливовим» параметром, ніж шорсткість, особливо на великих трубах При реконструкції безтраншейними методами зазвичай шорсткість зменшується (нові полімерні поверхні гладенькі). Наприклад, стара чавунна труба могла мати C = 80 (заросла корозією), а новий поліетиленовий вкладиш має C = 140. Це позитивно впливає на гідравліку, частково компенсуючи втрату діаметра. Крім того, усуваються витоки – отже, весь об'єм води працює на корисний потік, немає втрат тиску на несанкціоновані витоки. Однак, якщо діаметр зменшується суттєво (на 20% і більше), наслідки можуть бути відчутними: збільшаться градієнти тиску вздовж магістралей, у віддалених точках мережі тиск впаде, можливі проблеми із забезпеченням пожежного витрату тощо.

3.2 Аналіз впливу звуження трубопроводу на прикладі

Розглянемо спрощений приклад: є протяжний водогін, що живить віддалений район. До реконструкції – сталевий діаметром 500 мм, після реконструкції методом "труба в трубі" – поліетиленовий вкладиш діаметром 400 мм. Довжина ділянки 5 км, витрата в годину максимуму 100 л/с (0.1 м³/с).

Оцінимо, як зміняться втрати напору і кінцевий тиск. За формулою Хазена-Вільямса при Q=0.1 м³/с, L=5000 м, C \approx 130 (для нової ПЕ труби), отримуємо: Для D = 500 мм: h1 ≈ 4.3 м (втрати напору на ділянці)

Для D = 300 мм (припустімо ще менший діаметр для гіршого сценарію): h2 ≈ 52.2 м. Різниця колосальна: у першому випадку втрати невеликі, ~0.09 м на 100 м, у другому – понад 1% на 100 м. На рис. 1 нижче побудовано п'єзометричні лінії вздовж трубопроводу для двох варіантів (жовта – початковий Ø500, помаранчева – після звуження до Ø300) за умови постійного підживлюючого напору 50 м на початку ділянки.

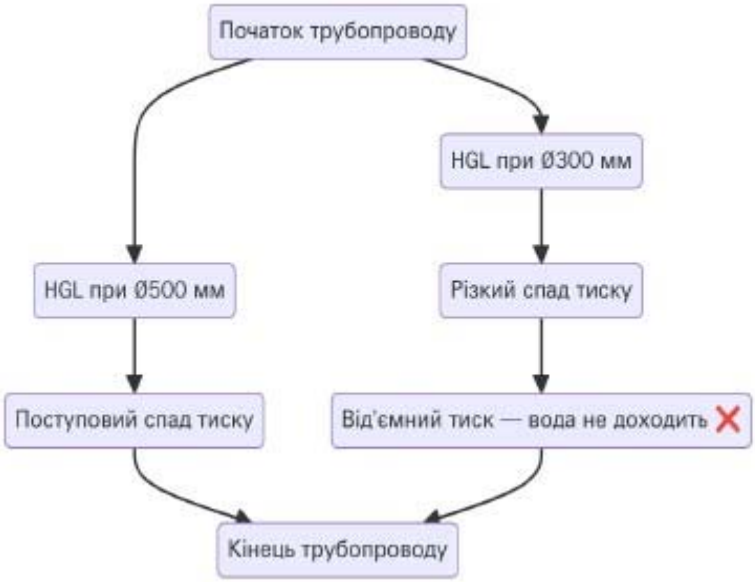


Рис.3.1– П’єзометричні лінії вздовж 5-кілометрового трубопроводу при нормальному діаметрі (500 мм, жовта лінія) та після реконструкції із зменшенням діаметра (300 мм, помаранчева лінія) для однакової витрати 100 л/с.

Видно значно більший градієнт напору у випадку меншого діаметра, що призводить до падіння напору до нуля і нижче (від’ємний напір означає, що вода б не дійшла до кінця при такому режимі). З графіка видно, що при значному звуженні трубопроводу існуючий напір може виявитись недостатнім: крива HGL (hydraulic grade line) опускається до рівня споживачів і далі (від’ємний надлишковий тиск) – фактично вода не зможе надходити у кінцеву точку з потрібною витратою. Звісно, це гіпотетичний екстремальний приклад (Ø300 замість Ø500). На практиці так радикально діаметр не зменшують без компенсаційних заходів.

Реалістичніший сценарій: Ø500 старий на Ø450 новий, або Ø250 на Ø200. Припустимо, стара труба Ø250 мм мала шорсткість C=100, нова Ø200 мм – C=150. Розрахунок дає, що втрати напору можуть зрости приблизно вдвічі. Це означає, що якщо раніше на 1 км трубопроводу втрачали 1 м напору, то тепер буде 2 м. У розгалуженій мережі це позначиться на кінцевих споживачах: у них статичний тиск може впасти на кілька метрів водяного

стовпа. Якщо раніше в крайніх точках було, скажімо, 15 м (1.5 атм), то стане 10 м (1.0 атм) – вже нижче нормативного мінімуму.

Пожежогасіння вимагає значного тимчасового витрату (10–15 л/с з гідранта). Такий різкий відбір викличе збільшені втрати напору вздовж магістралі. Якщо магістраль «вузька» після лайнера, може виявитись, що пожежного витрату не вдасться досягти – тиск просяде. Отже, при плануванні реконструкції необхідно виконувати гідравлічний розрахунок мережі з новими параметрами. Часто використовують програмні моделі (EPANET, WaterCAD тощо) для порівняння до і після. Якщо розрахунок показує суттєве погіршення – слід вживати заходів: або розбивати зону на менші, встановлювати додаткові насосні станції підвищення тиску, або обирати іншу технологію (наприклад, замість лайнера меншого діаметра застосувати метод розриву труби з прокладанням труби того ж діаметра – pipe bursting). Варто зазначити, що іноді реконструкція може і поліпшити гідравліку, попри звуження. Це відбувається, коли старий трубопровід був у критичному стані: заросли, з частковими затворами, з великими витоками. Після санації витоки ліквідуються – весь обсяг доходить до кінця, відсутні паразитні відбори.

Шорсткість зменшується – отже, втрати тертя нижчі. Цілком можливий випадок, що нова труба Ø200 ПЕ працюватиме не гірше старої Ø250, бо в останньої “живого” перерізу було ледь 150 мм через нарости. Такі ситуації описані в літературі: зокрема, в одному з англійських проєктів після реконструкції чавунного водопроводу Ø6” (150 мм) полімерним лайнером Ø125 мм тиск у кінцевих будинках… зріс на 5%, оскільки усунули численні свищі і підвищили C з ~90 до 140 (дані Thames Water, 2014, проект на вул. Бейкер-стріт, Лондон). Роль розміщення ділянки в мережі. Дослідження показують, що звуження магістралей ближче до насосної станції (джерела) більш критичне, ніж на периферії. Це інтуїтивно зрозуміло: якщо “бутилочне горло” біля джерела, то воно обмежує подачу на всю мережу. Якщо ж десь на кінці тупикової вітки трохи зменшився діаметр – постраждає тільки невелика зона. Тому при реконструкції ключових магістралей бажано не допускати

втрати пропускної здатності. На вторинних гілках можна більше застосовувати лайнерам меншого діаметра, тому що ефект локальний.

3.3 П’єзометричні карти режимів: нормальний vs після реконструкції

Для ілюстрації розглянемо умовну кільцеву водопровідну мережу (див. рис.2): дві насосні станції подають воду з протилежних кінців, споживачі рівномірно розподілені. При нормальному режимі (всі труби справні, Ø достатній) графік розподілу напорів рівномірний – на карті відмічені зони з тиском 30–40 м (зелений фон), мінімальний тиск ~28 м у найбільш віддаленому вузлі. Якщо одну ділянку (позначено червоним) реконструювати трубою меншого діаметра, її гідравлічний опір зросте. На п’єзометричній карті це відобразиться так: до місця звуження напори майже не зміняться, але за ним, в зоні, що живиться через цю ділянку, напір впаде. На рис.3.2 показано змінену картину – в нижній частині кільця тепер блакитні і сині відтінки, що відповідає тискам 15–25 м. Тобто споживачі там відчують зниження напору (на ~10 м порівняно з нормою). Водночас інша частина мережі (що живиться напряму від насосної без звуження) залишилась зеленою, майже без змін.

Це демонструє типову ситуацію: якщо реконструйована ділянка стала “вузьким місцем”, вона створює помітний перепад тиску на собі, фактично розділивши мережу на зони з різним гідравлічним рівнем. В деяких випадках таке небажано, і компанії намагаються уникнути цього, а в деяких – навіть застосовують свідомо: наприклад, щоб розділити систему на дві зони тиску, можуть реконструювати вставкою меншого діаметра, яка гасить частину напору (примусовий дросель). Проте зазвичай падіння тиску – негативний наслідок, який потребує компенсаторних заходів (наприклад, підняти напір на насосній). Примітка: для побудови реальних п’єзокарт використовують

програми моделювання і GIS. В нашому випадку рис.3.2–3.3 ілюстративні (схематичні), щоб відобразити якісні зміни.

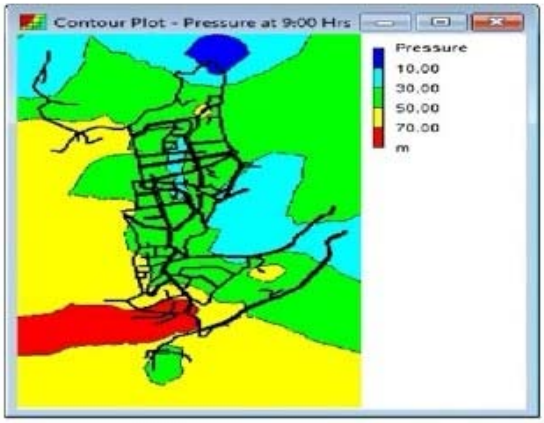


Рис.3.2– П’єзометрична карта нормального режиму водопровідної мережі – умовний приклад

Кольором показаний напір (в метрах): зелений – 30+ м, жовтий – ~25 м, блакитний – ~20 м тощо. Помітно, що різниця між секторами мережі невелика, найменший тиск ~28 м.)

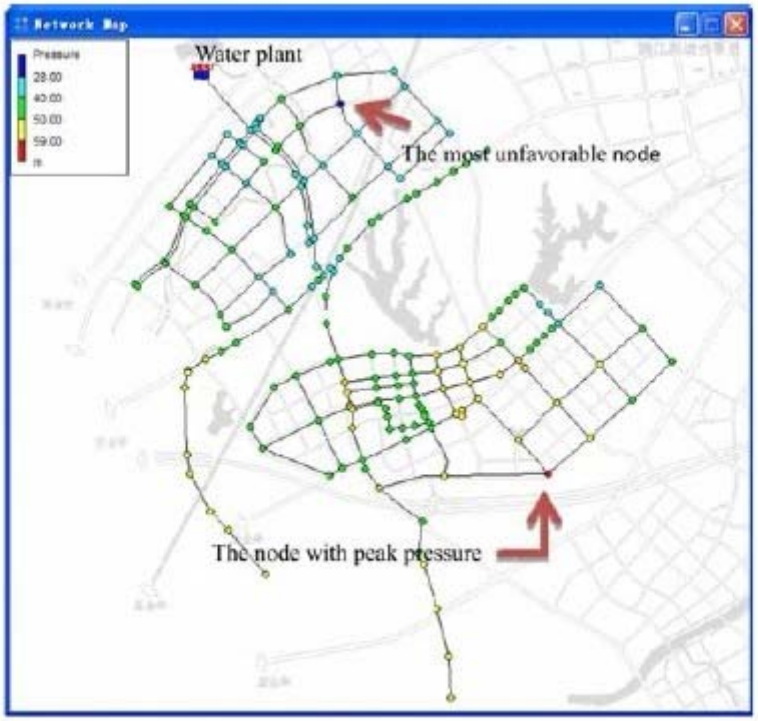


Рис.3.3 П’єзометрична карта режиму після реконструкції ділянки (позначено червоним) зі зменшенням діаметра

В нижньому секторі мережі тиск знизився до 15–20 м (синій колір), тоді як верхній сектор лишився майже без змін. Цей приклад демонструє, як “вузьке місце” впливає на зону за ним, створюючи своєрідну локальну зону низького тиску.)

3.4 Рекомендації з урахування гідравлічних наслідків при виборі технології реконструкції

Беручи до уваги наведений аналіз, можна сформулювати практичні рекомендації: Виконувати моделювання мережі перед вибором методу. Особливо для магістральних ділянок – порахувати втрати напору до і після, переконатись, що кінцеві тиски залишаться в допустимих межах. При необхідності – скоригувати експлуатаційні режими (підняти тиск на насосній тощо). Не допускати надмірного зменшення діаметра на критичних гілках. Якщо розрахунок показує значне погіршення, краще обрати інший метод (pipe bursting з новою трубою того ж Ø або прокладання паралельної лінії). Враховувати ефект шорсткості. Якщо стара труба дуже заросла, то навіть менша нова може мати кращу гідравліку. Отже, іноді побоювання щодо діаметра перебільшені. Достовірні дані про стан труби (шорсткість, наявність відкладень) допоможуть точніше оцінити ситуацію. Розташування ділянки. Якщо планується реконструювати методом лайнера з зменшенням Ø, варто, по можливості, робити це на периферійних ділянках мережі. Магістралі від ВЗС до міста краще ремонтувати без зменшення – наприклад, методом розриву із заміною на такий самий діаметр.

Зонування мережі. Якщо після реконструкції утворюється зона з нижчим тиском, можна розглянути варіант регулювання її як окремого району. Наприклад, встановити додатковий насос підкачки для цієї зони, або ж з’єднати її перемичками з іншими зонами, щоб забезпечити альтернативний шлях подачі води меншого опору. Перевірка на пожежні витрати. Обов’язково розрахувати, чи після реконструкції буде дотримано необхідний напір і

витрата для пожежогасіння. Якщо ні – можливо, доведеться передбачити гідрант із підвозом води (як тимчасовий захід) чи інші інженерні рішення. В цілому, вплив реконструкції на гідравліку – керований фактор. Сучасні інструменти моделювання дозволяють досить точно передбачити наслідки і врахувати їх у проекті. В добре спроєктованих випадках реконструкція навіть покращує роботу системи: ліквідовуються витоки, мережа стає “щільнішою”, зменшуються нічні провали тиску (бо менше витоків – менше падіння тиску при розборі). З другого боку, як було показано, необачне зниження діаметра може локально погіршити постачання.

Зменшення пропускної здатності відреконструйованої ділянки (через менший діаметр або інші фактори) призводить до росту гідравлічних втрат на ній, що може суттєво знизити тиск у зоні за цією ділянкою. Особливо це критично для магістральних труб і пікових режимів витрати. Для запобігання негативним наслідкам потрібні попередні розрахунки і за необхідності – коригуючі заходи. Правильно врахувавши ці аспекти, можна досягти того, що реконструйована мережа забезпечуватиме споживачів водою на належному рівні тиску і надійності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрієвський В. Ю. Безтраншейні технології прокладання та ремонту трубопроводів: навч. посіб. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2012. 180 с.

2. Андрущенко О. В. Моделювання режимів водопровідних мереж засобами EPANET // Вісник Київ. нац. ун-ту буд-ва і архіт. 2020. № 2. С. 45–53. URL: https://core.ac.uk/display/327566178 (дата звернення: 21.05.2025).

3. Білоконь С. М. Оцінка зношеності та пріоритетів реконструкції міських водогонів // Водні ресурси та водне госп-во України. 2022. Т. 9, № 1. С. 9–18.

4. Бойко В. С., Сотник І. М., Сотник М. І. Нормування водоспоживання та проблеми розвитку водопровідно-каналізаційного господарства міст // Наук. вісн. будівництва. 2021. № 14. С. 32–41.

5. Боярчук І. Ю. Керівні принципи управління тиском у водомережах. – Івано Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 112 с.

6. Василенко Г. П. Трубопроводи з поліетилену для водопостачання: розрахунок і проектування: монографія. Київ : Ліра-К, 2019. 224 с.

7. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013.– 64 с.

8. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Загальні вимоги. Київ : Мінрегіонбуд України, 2013. 56 с.

9. Доля Л. П., Машкіна Л. Б., Кожаєва В. А. Реконструкція систем водопостачання та водовідведення: монографія. Дніпро : Журфонд, 2021. 220 с.

10.ДСТУ EN 10298:2013. Трубопроводи сталеві та чавунні з цементно-піщаним покриттям внутрішньої поверхні. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 18 с.

11.Жук В., Боднар Т. Probability of simultaneous multiple leakages at sections of water networks… // Theory and Building Practice. 2023. Vol. 5, No 1. P. 72–83.

12.Заблоцький В. Ф. Гідравлічні розрахунки трубопроводів водопостачання в EPANET 2. Тернопіль : ТНТУ, 2022. 96 с.

13.Ільницький Я. О. Керівництво з пошуку та ліквідації прихованих витоків у водопровідних мережах. Луцьк : Східний видавн. дім, 2020. 88 с.

14.Коваленко М. П. Енергоефективність насосних станцій водопостачання. Одеса : ОНУ, 2019. 140 с.

15.Кравчук Р. В. Безтраншейна локальна санація чавунних труб методом коротких втулок // Вісник НУВГП. – 2024. № 1 (106). С. 21–27.

16.Литвин О. Г. Комп’ютерні системи диспетчеризації водопровідних мереж: посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2023. 152 с.

17.Мельник І. В. Акустичні методи діагностики витоків води: навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2021. 118 с.

18.Міністерство розвитку громад та територій України. Концепція реалізації держ. політики у сфері централізованого водопостачання та водовідведення на 2022–2030 рр. Київ, 2022. 15 с. URL: https://minregion.gov.ua/… (дата звернення: 21.05.2025).

19.Назарова Г. А. Сучасні матеріали для CIPP-лайнерів, сертифіковані для питної води // Вісник ХНУБА. 2021. № 6. С. 101–108.

20.Паламарчук І. М. Оцінка економічної ефективності реконструкції трубопроводів методом pipe-bursting // Економіка будівництва і міського господарства. 2020. № 3. С. 59–66.

21.Петренко М. С. Футеровка сталевих водогонів цементно-піщаним розчином. Харків : ХНАМГ, 2018. 84 с.

22.Семчук О. Т. Управління тиском у зонах DMA для зниження фонового витоку // Комунальне господарство міст. 2022. № 157. С. 112–118.

23.Тугай А. М., Орлов В. О. Водопостачання: підручник. – Київ : Знання, 2009. 735 с.

24.Федорченко Г. Л. Безтраншейні методи заміни аварійних трубопроводів великого діаметра // Будівництво України. 2023. № 4. С. 25–30.

25.Шмандій С. І., Бойченко С. Г. Інноваційні безтраншейні технології реконструкції інженерних мереж: монографія.– Київ : Центр навч. літ-ри, 2018. 320 с.

26.Яценко П. О. Гідравлічне моделювання впливу зменшення діаметра труби після санації // Теорія та буд. практика. 2023. № 2.– С. 79–85.

27.Ávila C. A. M., Sánchez-Romero F., López-Jiménez P. A., Pérez-Sánchez M. Leakage management and pipe system efficiency: its influence in the improvement of the efficiency indexes // Water. 2021. 13(14):1909. DOI:

10.3390/w13141909.

28.American Water Works Association (AWWA). Manual M28: Rehabilitation of Water Mains. 3rd ed.– Denver : AWWA, 2014. 208 p.

29.Berardi L., Laucelli D., Giustolisi O. Impact of rehabilitation strategies on leakage abatement in water distribution networks // Journal of Hydroinformatics. – 2022. 24(1). P. 1–16.

30.Booth A., Thompson J. Assessing carbon footprint of trenchless pipe rehabilitation techniques // Tunnelling and Underground Space Technology. 2023. 134:105059.

31.Cooper A., Struck S. Cement mortar lining of old cast-iron water mains: 60 years of experience // Proceedings of the ICE – Water Management. 2019. 172(8). P. 403–411.

32.EPA (US). EPANET 2.2 User Manual. – Cincinnati : National Risk Management Research Laboratory, 2020. 135 p. (open access).

33.Fanner P., Skipper R. Structural condition grading for pressurised potable water mains // Urban Water Journal. 2020. 17(10). P. 913–919.

34.Ferguson P., Herz R. Best practices for pressure management in DMA zones // IWA Water Asset Management Conf. Proc. – 2021. – P. 112–119.

35.Hicks J., Kaushal V., Jamali K. A comparative review of CIPP with spray applied pipe lining renewal methods for pipelines // Frontiers in Water. 2022.– 4:904821. DOI: 10.3389/frwa.2022.904821.

36.Hunaidi O. Detecting leaks in water-distribution pipes. NRC Construction Technology Update No. 40.– Ottawa : NRC, 2000. – 6 p.

37.Hashemi S., Filion Y., Speight V., Long A. The effects of pipe size and location on water-main headloss in WDSs // Journal of Water Resources Planning and Management. 2020. 146(6):06020006.

38.Muddassir M., Zayed T., Taiwo R., et al. Advancing the analysis of water pipe failures: a probabilistic framework // Scientific Reports. 2024. 14:19218. DOI: 10.1038/s41598-024-19218-0.

39.Nixon J., Speed R. Polyethylene pipe bursting for replacement of cast-iron water mains // Trenchless Technology. 2021. Aug. issue. P. 34–38.

40.PE100+ Association. Close-Fit Lining: Fold-and-Form Technical Guide. – 2023. URL: https://pe100plus.com (дата звернення: 21.05.2025).

41.Primus Line GmbH. Primus Line – Technology for the trenchless rehabilitation of pressure pipelines. 2022. URL: https://primusline.com (дата звернення: 21.05.2025).

42.Rajani B. B., Kleiner Y. Comprehensive review of structural deterioration of water mains // Urban Water. 2001. 3(3). P. 151–164.

43.Sægrov S. Pipeline rehabilitation and replacement. London : IWA Publishing, 2022. 352 p.

44.Shamir U., Howard C. Water distribution system leak detection: an advanced review // Water. – 2020. 12(12):3376.

45.Sun T., Kleiner Y., Brunet R. (math-based) Optimal scheduling of water main renewal considering HDPE sliplining // Structure and Infrastructure Engineering. 2021. 17(8). P. 1085–1097.

46.Thames Water Utilities Ltd. InsituMain pipe rehabilitation case studies 2014-2022. London : TWUL, 2023. URL: https://corporate.thameswater.co.uk (дата звернення: 21.05.2025).

47.Trenchless Technology Magazine. The shift to UV GRP pipe relining. 2021. URL: https://trenchlesstechnology.com (дата звернення: 21.05.2025).

48.USEPA. Water Network Tool for Resilience (WNTR) – Documentation and User Guide. – Washington, DC, 2023. URL: https://github.com/USEPA/WNTR (дата звернення: 21.05.2025).

49.World Bank. Ukraine – Water Supply and Sanitation Policy Note: Toward Improved Inclusive and Sustainable WSS Services. Washington, DC, 2021. 48 p.

50.Zhou J., Sattar A. Machine-learning-based leak detection in water distribution systems using WNTR simulations // Sensors. 2023. 23(4):1995. DOI: 10.3390/s23041995.

Поз	Позначення	Найменування	Кіл	Вага, кг	Прим.
1	ДСТУ EN 14339 : 2016	Пожежний гідрант	54		
2		Пожежна підставка	19	52,5	
		розтрубна Д=150			
3		те ж Д=200	11	75,0	
4		те ж Д=250	4	97,0	
5		те ж Д=300	7	121,0	
6		Засувка паралельна фланцева	15	112,0	
		з висувним шпинделем д=150			
7		те ж Д=200	4	183,0	
8		те ж Д=250	3	242,0	
9		те ж Д=300	4	310,0	
10		Засувка клинова фланцева			
		з висувним шпинделем д=400			
11		те ж Д=500	9	495,0	
12		те ж Д=600	1	625,0	
13		Трійник фланцевий з пожежною			
		підставкою 150×100			
14		Те ж 200×150	1	83,0	
15		Те ж 300×200	2	137,0	
16		Трійник розтруб-фланець	1	65,0	
		з пожежною підставкою 200×200			
17		Те ж 250×150	1	79,0	
18		Трійник фланцевий 500×300			
19		Трійник розтрубний 250×150	1	87,8	
20		Те ж 400×150	3	175,0	
21		Те ж 450×150	3	207,0	

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата
Розробив		Гогунський		
Консульт.		Савін		
Керівник		Савін		
Т. Контр.		Савін		
Н. Контр.		Гребенюк		
Затверд.		Банах		

ІННІ ЗНУ. Б.22803.006

Технологічні рішення реконструкції аварійних ділянок водопровідних мереж

Літ	Маса	Масштаб
Б		
Лист 6	Листів 6	

Деталювання мережі

ІННІ ім. Ю.М.Потебні ЗНУ 6.1921-мім

Поз	Позначення	Найменування	Кіл	Вага, кг	Прим.
22		Те ж 500×150	10	245	
23		Те ж 500×500	1	376	
24		Хрест фланцевий 400×200	2	178	
25		Те ж 400×250	1	187	
26		Те ж 500×150	1	216	
27		Те ж 500×500	1	430	
28		Те ж 600×500	1	489	
29		Хрест розтруб-фланець 500×150	1	253	
30		Хрест фланцевий з пожежною			
		підставкою 300×200			
31		Хрест розтруб-фланець	2	94	
		з пожежною підставкою 200×150 Д=150			
32		Перехід фланцевий 500×400	1	125	
33		Перехід розтрубний 200×150	1	379	
34		Те ж 250×200	1	53,1	
35		Те ж 400×300	1	115	
36		Перехід розтрубний 450×400	4	144	
37		Те ж 500×450	1	173	
38		Те ж 700×600	1	331	
39		Патрубок фланець-гладкий кінець	19	55,2	
		Д=150 мм			
40		Те ж Д=200 мм	8	84,5	
41		Те ж Д=250 мм	4	113	
42		Те ж Д=300 мм	5	143	
43		Те ж Д=400 мм	7	217	
44		Те ж Д=500 мм	9	299	

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата
Розробив		Гогунський		
Консульт.		Савін		
Керівник		Савін		
Т. Контр.		Савін		
Н. Контр.		Гребенюк		
Затверд.		Банах		

ІННІ ЗНУ. Б.22803.006

Технологічні рішення реконструкції аварійних ділянок водопровідних мереж

Літ	Маса	Масштаб
Б		
Лист 6	Листів 6	

Деталювання мережі

ІННІ ім. Ю.М.Потебні ЗНУ 6.1921-мім

Поз	Позначення	Найменування	Кіл	Вага, кг	Прим.
45		Патрубок фланець-гладкий кінець	1	395	
		Д=600 мм			
46		Трійник розтрубний 200×150	1	67,5	
47	ДСТУ 8943:2019	Труби сталеві електрозварні Д=150	120		
48		Те ж Д=200 мм	2325		
49		Те ж Д=250 мм	780		
50		Те ж Д=300 мм	1250		
51		Те ж Д=400 мм	440		
52		Те ж Д=450 мм	1250		
53		Те ж Д=500 мм	1650		

Вим.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	ІННІ ЗНУ. Б.22803.006			
Розробив		Гогунський			Технологічні рішення реконструкції аварійних ділянок водопровідних мереж	Літ	Маса	Масштаб
Консульт.		Савін				Б		
Керівник		Савін				Лист 6	Листів 6	
Т. Контр.		Савін			Деталювання мережі	ІННІ ім. Ю.М.Потебні ЗНУ 6.1921-мім		
Н. Контр.		Гребенюк						
Затверд.		Банах						