

Техніка і технології

УДК 622.691.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ РЕНОВАЦІЇ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

¹Я. В. Дорошенко, ²С. М. Стецюк, ³Р. В. Бондаренко, ⁴З. В. Данів¹ ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: ya.doroshenko@pung.edu.ua² Український науково-дослідний інститут природних газів;
61125, м. Харків, Гімназійна набережна, 20³ Район теплових мереж “Печерськ”, Структурний підрозділ “Київські теплові мережі”,
Комунальне підприємство “Київтеплоенерго”; 01103, м. Київ, вул. Товарна, 1⁴ Будівельно-монтажне управління, Філія Будівельно-монтажна фірма “Укргазпромбуд”,
Акціонерне товариство “Укртрансгаз”; 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Горбачевського, 1

Більша частина трубопроводних систем різноманітного призначення (газ, тепlopостачання, вода, каналізація) в Україні на сьогодні досягла значного ступеня зношення і перебуває в незадовільному стані, що є загрозою як безпеці життєдіяльності людини, так і екології. Складність, масовість, висока вартість ремонтних робіт зумовлюють потребу у вивченні та впровадженні сучасного світового досвіду, ефективних та економічних технологій. За останні десятиліття у багатьох розвинених країнах здійснено перехід від траншейних технологій ремонту трубопроводів до безтраншейного - як локального ремонту, так і реновації протяжних ділянок підземних трубопроводів. Тому метою статті є огляд безтраншейних технологій реновації трубопроводів, визначення їх можливостей, сфери застосування, переваг та недоліків. Обґрунтовано доцільність застосування безтраншейних технологій для реновації зношених, дефектних ділянок трубопроводних систем у важкодоступних місцях та в умовах міст. Розглянуто порядок підготовки трубопроводів до внутрішньотрубно́ї реновації (очищення внутрішньої стінки, внутрішньотрубне обстеження), описано методи та принцип роботи різних спеціальних пристроїв, які для цього застосовуються. Здійснено огляд, аналіз існуючих на сьогодні безтраншейних технологій реновації трубопроводів. Увагу акцентовано на двох найпоширеніших безтраншейних методах – *spray-applied pipelining*, який полягає в внутрішньотрубному нанесенні покриття із полімерних матеріалів і *cured-in-place pipe*, який полягає в армуванні внутрішньої поверхні трубопроводу спеціальним рукавом. Зазначено особливості, сферу застосування, можливості, переваги та недоліки кожного з методів, окреслено задачі, які можливо буде вирішувати у разі їх подальшого розвитку. Особливу увагу зосереджено на використовуваних для реновації трубопроводів матеріалах, вказано позитивні і негативні властивості кожного з них, сферу застосування. Описано технології виконання робіт у разі застосування цих методів, висвітлено принцип роботи спеціального обладнання, яке для цього застосовується. Виконаний огляд, аналіз підвищує рівень обізнаності, дає змогу зорієнтуватись у прийнятті рішення щодо вибору технологій, методів виконання робіт, матеріалів, обладнання для безтраншейної реновації трубопроводів та їх елементів, усвідомити значний потенціал цих технологій.

Ключові слова: рукав, армування, інверсія, захисне покриття, розпилення, пакер.

Most of the pipeline systems of various purposes (gas, heat supply, water, sewerage) in Ukraine today have reached a significant degree of wear and tear and are in an unsatisfactory condition, which is a threat to both safety and ecology. The complexity, mass, and high cost of repair work necessitate the study and implementation of modern world experience, effective and economical technologies. In recent decades, many developed countries have made a transition from trenchless pipeline repair technologies to trenchless, both local repair and renovation of long sections of underground pipelines. Therefore, the purpose of the article is to review trenchless pipeline renovation technologies, to determine their capabilities, scope of application, advantages and disadvantages. The expediency of using trenchless technologies for the restoration of worn, defective sections of pipeline systems in hard-to-reach places, in urban conditions, is substantiated. The procedure for preparing pipelines for intra-pipe restoration (cleaning of the inner wall, intra-pipe inspection) is considered, the methods and principle of operation of various special devices used for this purpose are described. An overview and analysis of the currently existing trenchless technologies for renovation of pipelines was carried out. Attention is focused on the two most common trenchless methods - spray-applied pipe lining, which consists in applying a coating of polymer materials inside the pipe, and cured-in-place pipe, which consists in reinforcing the inner surface of the pipeline with a special tube. Features, scope of application, possibilities, advantages and disadvantages of each of the methods are specified, problems that can be solved in case of their further development are outlined. Particular attention is focused on the materials used, the positive and negative properties of each of them, the scope of application are emphasized. The technology of performing work on the restoration of pipelines and their elements using the SAPL and CIPP methods is described, the principle of operation of the special equipment used for this purpose is highlighted. The technology of work performance in the case of the application of these methods is described, the principle of operation of the special equipment used for this purpose is highlighted. The performed review and analysis increases the level of awareness, makes it possible to orientate in decision-making regarding the choice of technologies, methods of work, materials, equipment for trenchless restoration of pipelines and their elements, to realize the significant potential of these technologies.

Keywords: tube, reinforcement, inversion, sheeting, spraying, packer.

Вступ

Одним із напрямків диверсифікації, децентралізації енергетики є перехід до мультигазових мереж, мультигазової інфраструктури, яка в середньо- та довгостроковій перспективі буде елементом водневої енергетики. Із часом природного газу в газових мережах буде все менше. Натомість біометану, різних штучних газів, водню буде більше, що не тільки диверсифікує енергетику, зробить її стійкішою, а дасть змогу відкрити нові бізнеси, буде сприяти зайнятості. Проблемою є зношеність газових трубопроводних систем в Україні, більшість трубопроводів якої побудовані в 60–70 роки і на сьогодні досягнули значного ступеня старіння. Тому перед переведенням на транспортування мультигазових сумішей та водню треба продіагностувати стінки труби і провести значні обсяги ремонтних і відновлювальних робіт. J. Odgen (2018) та Я. Дорошенко (2023) зазначають, що багато уваги цьому треба приділяти у разі додавання до природного газу водню, оскільки частина водню, що перебуває під тиском, адсорбується на стінці труби і дифундує в сталь, що призводить до зародження тріщиноподібних дефектів (водневої крихкості). Особливо небезпечною є воднева крихкість за наявності дефектів внутрішньої стінки трубопроводу. Зношеність газових трубопроводних систем є також небезпечною через можливість виникнення витоків природного газу, які можуть призводити до вибухів, викидів у атмосферу метану, який є парниковим газом.

Через тривалу корозію та значне старіння великою проблемою є зношеність мереж тепло-, водопостачання і каналізації, яка на сьогодні досягає 60-90 %. Часті аварії трубопроводів таких мереж у містах призводять до багатьох негативних наслідків, зокрема, фонтанування води (зокрема окропу) та її втрати, розмивання ґрунту під автодорогами і руйнування асфальту, провалювання автомашин та виникнення заторів через розливи води (Поляруш, 2020).

У працях С. Маєвського (2021) та В. Воловського (2022) акцентовано увагу на проблему накопичення рідини (пластової, конденсаційної води та вуглеводневого конденсату) під час експлуатації газоконденсатних свердловин, яке відбувається на їх вибої, у стовбурі, а також у понижених ділянках шлейфів, міжпромислових трубопроводів. Такі рідкі накопичення призводять до інтенсивних внутрішньотрубних корозійних процесів і зношення трубопроводів.

Якщо належним чином підтримувати застарілі трубопроводні системи, тоді не обов'язковою стане їх надзвичайно вартісна заміна. Відновлювати, ремонтувати застарілі підземні комунікації міських мереж траншейними технологіями важко та дорого, особливо у великих містах, де такі системи є надзвичайно складними. Такі роботи вимагають багато часу і призводять до численних незручностей: потрібно перекривати автодороги, тротуари, розкопувати трубопроводи, руйнуючи при цьому асфальтове покриття. Відтак потрібний благоустрій цих територій. Крім того, безліч ділянок

трубопроводів прокладено у важкодоступних місцях: під річками, залізницями, іншими спорудами, де практично неможливо застосовувати традиційні методи ремонту.

На сьогодні найефективнішими, економічно вигідними технологіями діагностування стану стінки труби, ремонту, реновації трубопроводів є безтраншейні технології, коли земляні роботи мінімізовано або вони відсутні. М. Najafi (2021) та Y. Doroshenko (2019) констатують, що найдоцільніші такі технології в містах, де багато трубопроводів пролягають під автодорогами, вимощеними тротуарами з інтенсивним автомобільним і пішохідним рухом, велика кількість різноманітних підземних комунікацій, які можна пошкодити у разі застосування традиційних технологій. Також, як правило, найстаріша частина трубопроводних мереж зосереджена в центрі міст, де доволі часто влаштовувати траншеї заборонено.

Безтраншейні технології ефективні під залізницями, каналами та річками, в інших важкодоступних місцях, де надзвичайно складно, дорого або навіть неможливо застосовувати траншейні методи ремонту. Проте в Україні на сьогодні найчастіше застосовуються траншейні технології ремонту трубопроводів, а безтраншейні практично не застосовуються, хоча в багатьох випадках, особливо в великих містах, потрібно виконати ремонт, реновацію трубопроводної інфраструктури. Причиною цього є мала кількість спеціалізованих організацій, які б займалися такими роботами, розвивали безтраншейні технології ремонту трубопроводів. На противагу цьому у найрозвинутіших країнах на сьогодні безтраншейні технології в основному використовуються для відновлення, локального ремонту трубопроводів міських мереж, важкодоступних ділянок, а траншейні – для заміни, реконструкції ділянок трубопроводів.

В останні десятиліття у багатьох розвинених країнах здійснено перехід від траншейних технологій ремонту трубопроводів до безтраншейних, як локального ремонту, так і відновлення, реновації протяжних ділянок підземних трубопроводів. Одними з основних причин цього є збільшення екологічного та соціального тиску, особливо в великих містах. Тому постійним розвитком, вдосконаленням безтраншейних технологій займаються багато науковців, організацій, і вони досягли високого рівня, характеризуються різноманітністю. Кожна з технологій має свою специфіку, сферу застосування, що ускладнює прийняття рішень щодо вибору оптимального варіанту технології. Тому огляд та аналіз існуючих безтраншейних технологій,

їх класифікація, опис, встановлення переваг і недоліків дасть змогу швидше зорієнтуватись у цьому виборі, бути більше обізнаним та усвідомити значний потенціал цих технологій.

Метою статті є огляд безтраншейних технологій реновації трубопроводів, визначення їх можливостей, сфери застосування, переваг та недоліків.

Огляд літератури

К. Поляруш (2016) та С. Тихонов (2015) зазначають, що найбільшими перевагами безтраншейного ремонту, реновації протяжних ділянок трубопроводів є зниження витрат на ремонт на 40-50 %, продуктивність робіт збільшується в рази, що дає змогу підвищити темпи виконання робіт. Крім того, відсутні значні труднощі з розкопуванням дефектних трубопроводів, не потрібно багатьох і часто дорогих та довготривалих узгоджень на виконання ремонтних робіт, не треба перекривати дороги, руйнувати дорожнє покриття. Основними недоліками переважної більшості безтраншейних технологій ремонту трубопроводів є необхідність у залученні спеціалізованої техніки, складності у виборі місць відводів від трубопроводу, фасонних елементів.

М. Mainak (2015) підкреслює, що додатковими перевагами безтраншейних технологій над траншейними є менший обсяг інженерії (проектних розрахунків, креслень, геодезії тощо). Також зазначає: незалежно від вартості виконання ремонтних робіт такі технології є кращими.

Однак, в нормативному документі Normalización técnica de la EAAB-ESP: NS-058, NS-060, NS-061 (2001) вказано, що для ремонту ділянок трубопроводів, які містять тріщини, порушення форми поперечного перерізу все ж потрібно застосовувати траншейні технології. Крім того, D. Marlow (2015) зазначає, що існують регулятивні та експлуатаційні обмеження для кожної конкретної ділянки трубопроводу, які перешкоджають застосуванню безтраншейних технологій.

А. Kristowska (2018) та G. Lichtbuer (2016) порівнюють безтраншейні технології спорудження, реновації, відновлення трубопроводів із траншейними. Критеріями, на які зосереджено увагу, є екологічний вплив, безпека, вплив на рух транспорту та вартість (прямі витрати на проектування та виконання робіт, непрямі впливи через припинення руху транспорту тощо). Встановлено, що усі розглянуті безтраншейні технології мають ряд переваг порівняно з

траншейними. Це мінімізація впливу на довкілля, мінімізація загальних витрат на виконання робіт і соціального впливу. Основними недоліком розглянутих безтраншейних технологій реновації, відновлення трубопроводів є необхідність розкопування в місцях відводів від трубопроводу і виконання з'єднань у цьому місці.

Для того, щоб порівняти вартість реновації трубопроводів двома найпоширенішими безтраншейними технологіями CIPP (cured-in-place), який полягає в армуванні внутрішньої поверхні трубопроводу спеціальним рукавом і SAPL (spray-applied pipelining), який полягає в внутрішньотрубному нанесенні покриття із полімерних або цементних матеріалів R. Serajiantehrani (2021) виконав комплексний аналіз понад 400 проєктів. Встановлено, що реновація трубопроводів технологією CIPP є дешевшою, ніж SAPL. У підсумку рекомендовано технологію безтраншейного відновлення трубопроводів CIPP. J. Hicks (2022) порівняв технології CIPP і SAPL за такими параметрами, як вплив на довкілля, вплив на механічні властивості ремонтного трубопроводу, продуктивність, вартість. Встановлено, що відремонтовані CIPP технологіями трубопроводи мають більшу міцність, і це дає змогу трубі витримувати більші навантаження, ніж до ремонту. Тому такі технології застосовуються для відновлення газопроводів, водопроводів, каналізації та навіть трубопроводів для транспортування різних хімічних речовин.

Матеріали та методи

Безтраншейні технології – це набір методів, матеріалів і обладнання для спорудження, заміни, перенесення, діагностування, ремонту та відновлення підземних комунікацій із мінімальним виконанням земляних робіт та розкопуванням поверхні землі. Безтраншейні технології успішно застосовуються для всіх підземних інженерних комунікацій – газопроводів, водопроводів, каналізації, промислових трубопроводів тощо. (Trenchless Technology, 2023)

Безтраншейні технології ТТ (Trenchless Technology) поділяються на методи безтраншейного спорудження трубопроводів TCM (Trenchless construction methods) і методи безтраншейного відновлення трубопроводів TRM (Trenchless renewal methods).

Безтраншейне спорудження трубопроводів можна застосувати для заміни існуючих трубопроводів у важкодоступних місцях. Такі роботи зазвичай виконують, коли трубопровід має значні пошкодження, а ремонт є неможливий або

дуже дорогий. Нову ділянку трубопроводу безтраншейно прокладають поруч із існуючою.

Методами безтраншейного відновлення трубопроводів виконують реновацію протяжних ділянок, локальний ремонт.

Перед безтраншейною реновацією трубопроводу за потреби, треба очистити внутрішню стінку дефектної ділянки трубопроводу. Якісне очищення забезпечує необхідну адгезію матеріалів, якими буде виконано відновлення трубопроводу.

У цьому дослідженні на основі огляду, аналізу різних джерел інформації (література, веб-сайти спеціалізованих компаній, інформація експертів і виробничі спостереження) описано можливості, переваги та обмеження щодо сфери використання різних методів, технологій безтраншейної реновації трубопроводів, надано рекомендації щодо вибору оптимального варіанту залежно від стану трубопроводу, довжини дефектної ділянки, елементу трубопроводу (відвід, трійник), який треба відновлювати. Увагу приділено огляду матеріалів, які застосовуються для безтраншейної реновації трубопроводів, особливостям технологій їх нанесення.

Послідовність подання результатів роботи відповідає послідовності основних етапів процесу безтраншейної реновації трубопроводу, а саме:

- очищення внутрішньої стінки;
- внутрішньотрубне обстеження;
- безтраншейна реновація стінки труби, елементів трубопроводу (відводів, трійників);
- внутрішньотрубний відеоконтроль.

Результати та обговорення

Внутрішні стінки трубопроводів найчастіше очищують струменевими методами (гідроструменевий, гідроабразивний, піскоструменевий). Для цього застосовують різні спеціальні пристрої, які складаються зі струменевих апаратів і підтримуючого пристосування (рис. 1). Підтримуюче пристосування виконано таким чином, щоб пристрій можна було застосовувати для різних діаметрів трубопроводу і він легко переміщувався внутрішньою порожниною. Струменеві апарати містять головку, яка обертається стисненим повітрям або водою.

Також все більшого поширення набуває роботизоване абразиво-струменеве очищення внутрішньої стінки дефектних ділянок трубопроводу, перевагами якої є точний контроль, велика продуктивність, менша витрата абразиву, постійна програмована швидкість руху вперед і назад, відеоконтроль встановленими в передній і задній частині відеокамерами (рис. 2).

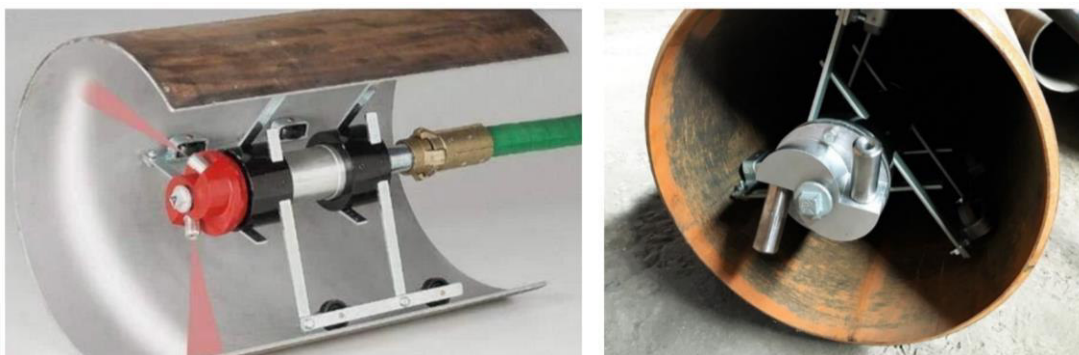
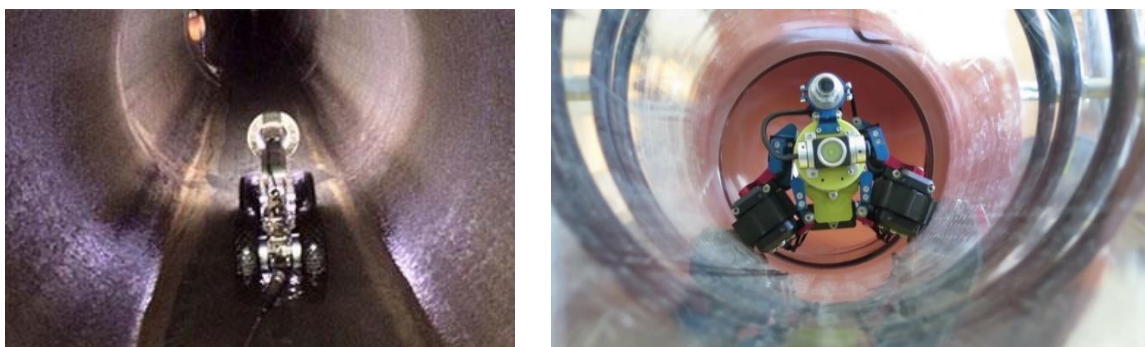


Рисунок 1 – Пристрої для струменевого внутрішньотрубного очищення трубопроводів
 Джерело: (Internal Pipe Cleaning Equipment, 1996-2023, Spin-Blast, 2012-2017)



Рисунок 2 – Роботизоване абразиво-струменеве очищення внутрішньої стінки трубопроводу
 Джерело: (4 Key Benefits of Robotic Abrasive Blasting, 2015)



а) – колісний рушій; б) – гусеничний рушій

Рисунок 3 – Кроулер

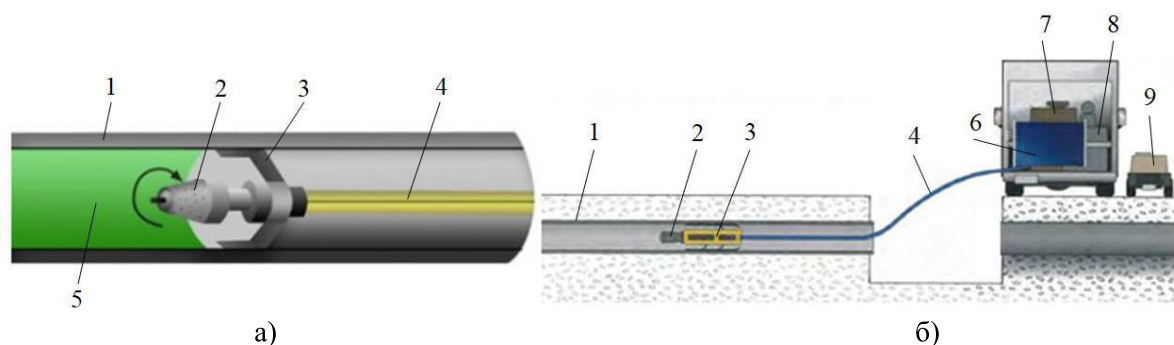
Джерело: (Video Sewer Inspections across Chicagol and, 2023, Tracked mobile robot for pipeline inspection with an active adaptation system, 2017)

Після очищення внутрішньої стінки трубопроводу треба виконати внутрішньотрубне обстеження, яке полягає, здебільшого, у відеоогляді. Крім того, обстеження виконують лазерним скануванням, ультразвуковим діагностуванням. Для відеоогляду на сьогодні застосовують цифрові відеокамери. Цифрове відеозображення та результати лазерного діагностування дають змогу за допомогою комп'ютерної графіки отримати чітке 3D графічне зображення внутрішньої поверхні трубопроводу.

Відеокамери, освітлювальні пристрої та інше обладнання для обстеження трубопроводів розміщують на самохідних діагностуваль-

них роботах, які ще називають кроулерами. Кроулери можуть мати колісний (рис. 3, а) або гусеничний (рис. 3, б) рушій і переміщуються трубопроводом в автономному режимі (живлення від акумулятора) або живляться з допомогою кабеля. Кроулери з гусеничним рушієм є маневровими і їх доцільно застосовувати у місцях, де ділянки трубопроводу мають значний нахил, є відводи з малим радіусом вигину та трійники, де необхідно змінити напрям руху кроулера.

Результати внутрішньотрубного обстеження дають змогу визначити проблеми трубопроводної системи та, врахувавши їх та усі інші



а) – внутрішньотрубне нанесення захисного покриття; б) – протягування пристрою трубопроводом;
 1 – відновлюваний трубопровід; 2 – форсунка; 3 – підтримуюче пристосування; 4 – шланг;
 5 – внутрішньотрубне покриття; 6 – лебідка шлангова барабанна; 7 – дозувальний насос;
 8 – резервуар; 9 – компресор

Рисунок 4 – Схема машинного внутрішньотрубного нанесення захисного покриття

Джерело: (Lichtbuer, 2016, Marcino, 2015)

обставини, вибрати найефективніше, економічне рішення, встановити, які безтраншейні технології можуть бути застосовані.

Методи безтраншейної реновації трубопроводів можна поділити на дві групи:

- неструктурні;
- структурні.

Неструктурні методи є одними з найновіших на сьогодні і полягають у внутрішньотрубному нанесенні розпиленням захисного покриття. Такі методи мають загальну аббревіатуру SAPL (spray-applied pipelining – облицювання труб, нанесене розпиленням).

SAPL методи застосовують, коли потрібно відновити частково зношені ділянки трубопроводів значної довжини або здійснити локальний ремонт. Також перспективним є нанесення такими методами бар'єрного захисного покриття на внутрішню стінку трубопроводів для їх захисту від водневої крихкості.

Надзвичайно важливе значення має матеріал захисного покриття. Покриття повинно бути таким, щоб його можна було якісно нанести і воно забезпечувало тривалий захист внутрішньої стінки трубопроводу від корозії та не зношувалось з часом. У разі відновлення протяжних ділянок трубопроводів вагомим чинником є вартість покриття. На сьогодні застосовують покриття із полімерних матеріалів, епоксидну смолу, поліестер, силікон і поліуретан. Також застосовують суміш епоксидної смоли і поліуретану, яка добре захищає стінку від корозії. (Hicks, 2022, Najafi, 2021).

Внутрішньотрубно наносити захисне покриття можна трьома різними методами – ручне, машинне і роботизоване розпилення.

Ручне внутрішньотрубне розпилення захисного покриття виконують для відновлення не-

протяжних ділянок трубопроводів великого діаметра.

Для внутрішньотрубного машинного розпилення застосовують різні спеціальні пристрої, які складаються з форсунки 2, що обертається, і підтримуючого пристосування 3 (рис. 4, а). Підтримуюче пристосування виконано таким чином, щоб пристрій можна було застосовувати для різних діаметрів трубопроводу.

Щоб пристрій переміщувати трубопроводом 1, необхідно через усю відновлювану ділянку проштовхнути або протягнути (попередньо проштовхнутим жорстким склудротом) шланг 4. Тоді до нього під'єднати пристрій для розпилення захисного покриття і лебідкою 6 (рис. 4, б) або вручну протягувати його трубопроводом 1.

Захисне покриття на внутрішню стінку трубопроводів наноситься безповітряним розпиленням. Технологія безповітряного розпилення ґрунтується на опорі навколишнього повітря струменю рідкого ізоляційного матеріалу, який витікає з форсунки з великою швидкістю (тиск до 25 МПа) (Дорошенко, 2009). У разі перевищення критичної швидкості відбувається розривання і дроблення струменя покриття. Для безповітряного розпилення захисне покриття з резервуару 8 шлангом високого тиску 4 подають дозувальним насосом 7 (рис. 4, б).

Форсунки мають пневматичний привод. Тому до пристрою, крім шлангу для подавання покриття, треба під'єднувати шланг для подавання повітря (рис. 5, а) від компресора. Покриття розпилюється форсункою (рис. 5, б), яка обертається потоком повітря. Швидкість обертання форсунки регулюють витратою повітря.

Внутрішньотрубне роботизоване розпилення виконують самохідними дистанційно ке-



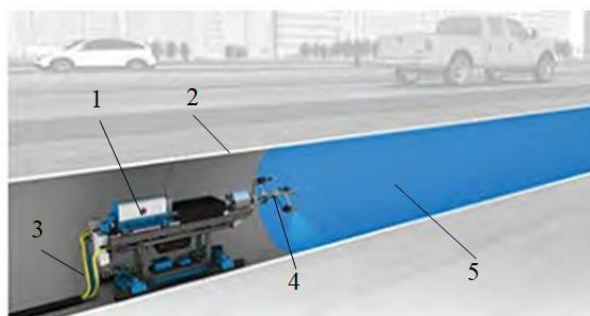
а) – пристрій безповітряного розпилення; б) – безповітряне розпилення захисного покриття

Рисунок 5 – Машинне внутрішньотрубне нанесення захисного покриття

Джерело: (Pipecoater, 2023, Serajiantehrani, 2021)



а)



б)

а) – внутрішньотрубний робот; б) – схема безповітряного розпилення роботом захисного покриття;
1 – внутрішньотрубний робот; 2 – відновлюваний трубопровід; 3 – шланг; 4 – форсунка;
5 – внутрішньотрубне покриття

Рисунок 6 – Роботизоване внутрішньотрубне нанесення захисного покриття

Джерело: (PipeCoatingServices, 2020, Marcino, 2015)

рованими роботами, які переміщуються трубопроводом за допомогою колісного (рис. 6, а) або гусеничного рушія. Так само, як і у разі машинного внутрішньотрубного нанесення, у форсунки 4 робота 1 шлангами 3 подають покриття і повітря (рис. 6, б). Переміщення внутрішньотрубного робота з постійною швидкістю дає змогу наносити однорідний шар покриття необхідної товщини вздовж усієї відновлюваної ділянки трубопроводу.

Перевагами SAPL методів є те, що нанесення на внутрішню стінку трубопроводів захисне покриття дає змогу відновити частково зношені ділянки трубопроводів, запобігти подальшому погіршенню їх технічного стану, зокрема, внутрішньотрубній корозії, збільшити термін служби трубопроводів та зменшити шорсткість їх внутрішньої поверхні, чим покращити гідравлічні характеристики.

Для магістральних газопроводів SAPL методи застосовують здебільшого для того, щоб зменшити шорсткість внутрішньої поверхні, що, в свою чергу, дає змогу зменшити перепад тиску між компресорними станціями. У цьому разі потрібна менша витрата палива (Najafi, 2021).

Недоліками SAPL методів є те, що захисне покриття є тонким, тож його нанесення не підвищує міцність трубопроводу. Із тієї ж причини його не можна застосовувати для запобігання витіканню транспортованого середовища з трубопроводу у разі виявлення наскрізних дефектів.

Структурні методи полягають у встановленні у внутрішню порожнину дефектних ділянок трубопроводів різноманітних лайнерів (вкладок), які покращують структурну цілісність, запобігають витокам, розривам та іншим

значним пошкодженням. Найпоширенішими методами такого безтраншейного відновлення трубопроводів є:

– “CIPP” – армування внутрішньої поверхні трубопроводу з щільним приляганням спеціального рукава;

– “U-лайнер”, “C-лайнер” та “Swagelining” – протягування деформованої полімерної труби в дефектний сталевий трубопровід з її розширенням до щільного прилягання до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу;

– “труба в трубі” – протягування чи проштовхування полімерної труби меншого діаметра в дефектний сталевий трубопровід;

– протягування полімерної труби з руйнуванням дефектного трубопроводу;

– “Прімум Лайн” – протягування синтетичного рукава в дефектний сталевий трубопровід.

Найпоширенішим на сьогодні структурним методом, який характеризується різноманіттям технологій і якому буде приділена увага, є CIPP. Результати проведеного компанією Trenchless Technology опитування (Bueno, 2014) засвідчили, що вісімдесят чотири відсотки опитаних комунальних підприємств у Сполучених Штатах регулярно використовують CIPP-метод для відновлення стану своєї підземної інфраструктури. Цей метод став основним економічно ефективним методом вирішення багатьох проблем із трубопровідною інфраструктурою і дає змогу покращувати та модернізувати трубопровідні мережі. CIPP-методом можливо відновити структурну цілісність ділянок трубопроводів, які потребують дорогої заміни, і суттєво продовжити термін їх експлуатації (Bueno, 2014). Інші також поширені структурні методи, їх переваги і недоліки описано в (Поляруш, 2016, Тихонов, 2015, Doroshenko, 2019).

CIPP метод застосовується як для повністю, так і для частково зношених водопроводів, теплопроводів, каналізації (Chuk, 2011, Lanzo Lining Services, Inc, 2010), для частково зношених газопроводів середнього та низького тиску газових мереж та трубопроводів, якими транспортують різні хімічні речовини діаметром від 100 мм до 3000 мм та довжиною понад 900 м (Lanzo Lining Services, Inc, 2010).

Особливістю CIPP методу є поміщення спеціального безшовного тонкого рукава у внутрішню порожнину відновлюваної ділянки, елемента (відвід, трійник) трубопроводу і затвердіння його для створення нової структурної труби у дефектній. Щоб рукав затвердів, його до встановлення в відновлюваний трубопровід просочують спеціальною смолою (Serajiantehrani, 2021, Chuk, 2011).

Фізико-механічні характеристики матеріалу рукава та смоли, якою його просочують, суттєво впливають на міцність відновленої ділянки трубопроводу, її довговічність.

Рукави виготовляють із круглого тканого текстилю, поліестеру, склотканини, скловолокна, поліуретану або поліефіру (Najafi, 2021). Також застосовують композиційні рукави, які є звичайними рукавами, що армовані шарами вуглецевого волокна та/або скловолокна, термопластичних поліефірних, поліпропіленових волокон, закріплених у щільну повсть. Вуглецеве волокно забезпечує більшу жорсткість рукава, а скловолокно – кращий захист від корозії (Chuk, 2011).

Велику питому жорсткість і міцність, а також підвищену стійкість до корозії, підвищену стійкістю до втоми мають рукави, виготовлені з армованого волокном полімеру FRP (fibre-reinforced polymer) (Lee, 2010). FRP – це композиційний матеріал, виготовлений з полімерної матриці, армованої скляними, вуглецевими, базальтовими або арамідними волокнами (Руднева, 2020).

Епоксидно-поліефірна структура рукава забезпечує значний опір зовнішнім навантаженням, а епоксидно-скловолоконна – велику міцність на розрив (Soldati, 2021).

Для підвищення гладкості на внутрішню поверхню рукава наносять термопластичне покриття. Залежно від діаметра трубопроводу і внутрішнього тиску товщина і кількість шарів композиційних рукавів може бути різною.

Щоб забезпечити затвердіння і створення нової структурної труби у дефектній, рукави просочують різними смолами. Є три основні групи терморективних смол – поліефірні, вінілові ефіри і епоксидні. У кожній із цих трьох груп існують сотні комбінацій із специфічними характеристиками, які забезпечують їх ефективність у певних обставинах. (Lanzo Lining Services, Inc, 2010) Усі смоли мають різні короткочасні властивості при згинанні та розтягуванні. Епоксидна смола зазвичай застосовується для відновлення трубопроводів, які працюють під тиском, а поліестер – каналізаційних систем. Міцність і жорсткість затверділих нових структурних труб визначається міцністю смоли. Епоксидний вініловий ефір має кращу збалансовану жорсткість та більшу міцність, ніж епоксидні і поліефірні смоли. (Mifek, 2007)

Смолу та просочений нею рукав доцільно охолодити, що уповільнить хімічну реакцію та підвищить рівень безпеки під час транспортування та встановлення.



а)



б)

а) – із кріпленням у фланці; б) – із застосуванням інверсійної труби

Рисунок 7 – Поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу пневматичною інверсією
Джерело: (Поляруш, 2016, Project of the Year Rehabilitation Runner, 2020)

Рукави у відновлювані ділянки трубопроводів поміщають різними способами – гідростатичною інверсією, пневматичною інверсією та протягуванням і надуванням повітрям або водою (Serajiantehrani, 2021, Nicks, 2022, Kozman, 2013). Для кожного способу необхідне своє спеціальне обладнання.

Процес інверсії полягає в притисканні до внутрішньої стінки відновлюваної ділянки трубопроводу рукава під тиском повітря, пари або води.

Встановлення починається із вимірювання і відрізання необхідної довжини рукава. Тоді змащують його внутрішню поверхню смолою. Для цього смолу заливають у внутрішню порожнину рукава, який протягують через систему притискних валиків, відкаліброваних до товщини рукава (рис. 7). Таким чином, рівномірно наносять смолу вздовж рукава, яка починає просочуватись в його стінку. Щоб запобігти наявності повітря і забезпечити рівномірний розподіл смоли просочування виконують на заводі під вакуумом шляхом попереднього видалення з нього повітря і протягування через систему валиків (Lanzo Lining Services, Inc, 2010).

Якщо відновлюють трубопроводи великих діаметрів, то просочування смолою зазвичай виконують у базових умовах. Тоді рукав змотують, завантажують у вантажівку-рефрижератор і транспортують на місце виконання робіт. При правильному поводженні та зберіганні просочені смолою рукави можуть бути стабільними до тижня або більше. (Lanzo Lining Services, Inc, 2010). У разі відновлення

трубопроводів малого діаметра процес просочування рукава смолою зазвичай виконують на монтажному майданчику.

Пневматична інверсія полягає у вивертанні рукава внутрішньою стороною назовні тиском повітря, яке подають від компресора. Таким чином, рукав проштовхують у відновлювану ділянку трубопроводу. Після вивертання просякнута смолою сторона рукава пристає до внутрішньої стінки трубопроводу, і рукав перетворюється на тверду, структурно міцну трубу. (Поляруш, 2016) Якщо пневматичною інверсією прокладають рукави великого діаметра, то після зав'язування і змотування одного кінця, інший затискають в фланці установленій на автомашині установки (рис. 7, а) або міцно прикріплюють до верхнього чи нижнього кільця інверсійної (направляючої) труби (рис. 7, б) і тиском повітря вивертають рукав.

Для поміщення рукавів у відновлювані трубопроводи малого діаметра застосовують малогабаритні установки – інверсійні барабани. Барабан, на який штурвалом намотують рукав, міститься в герметичній камері. Передній кінець рукава вивертають і кріплять хомутом до носової частини інверсійного барабана (рис. 8, а). Тиском повітря вивертають рукав і поміщують його у відновлюваний трубопровід (рис. 8, б).

Гідростатична інверсія виконується заповненням інверсійної труби водою. Гідростатичний напір води безперервно штовхає рукав поздовжньо у відновлюваний трубопровід і вивертає його навиворіт, щільно притискаючи при цьому просочену смолою сторону до внутрішньої стінки (рис. 9) (EPA 832-F-99-032, 1999).



а)

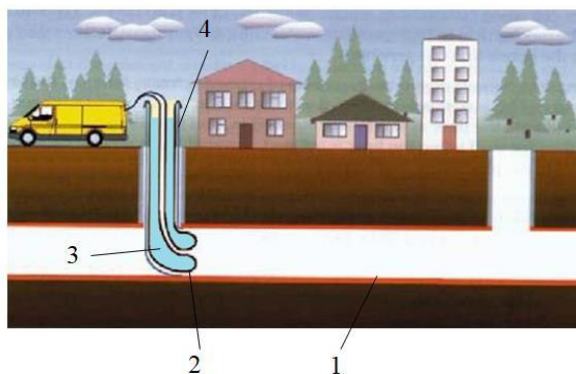


б)

а) – закріплення рукава до носової частини інверсійного барабана;
б) – вивертання рукава тиском повітря

Рисунок 8 – Пневматична інверсія рукава малого діаметра

Джерело: (Elephant Pipe Relining, 2023, The Best Trenchless Sewer Pipe Repair in Atlanta, 2023)



а)



б)

а) – схема виконання робіт; б) – технологічний процес

1 – відновлювана ділянка трубопроводу; 2 – рукав; 3 – вода; 4 – інверсійна труба

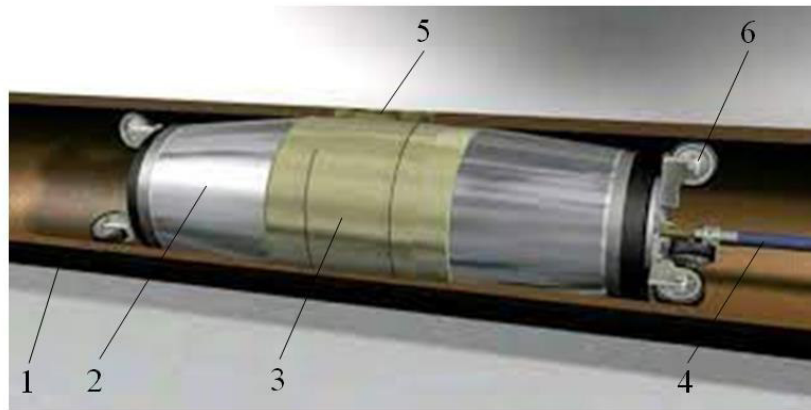
Рисунок 9 – Поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу гідравлічною інверсією

Джерело: (Modricker, 2023, The Safety of CIPP, 2023)

Для поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу способом протягування біля робочого котловану розміщують барабан з рукавом, а біля приймального – тяговий засіб (лебідка, тягач тощо). Тоді через відновлюваний трубопровід проштвхують жорсткий дріт, яким затягують тяговий трос. Тяговий трос кріплять до рукава і тяговим засобом протягують через відновлювану ділянку трубопроводу. Протягнутий рукав заглушують з двох сторін і надувають повітрям або водою, в результаті чого він притискається до внутрішньої стінки трубопроводу. Такий спосіб є доцільним у багатьох випадках. Для прикладу, якщо відновлювана ділянка трубопроводу містить труби різного діаметра.

Якщо необхідно виконати місцевий ремонт і відновити непряжну ділянку трубопроводу, то для поміщення рукава в необхідне місце можна застосувати пакер або роботизований пристрій.

Пакером є заглушена з двох сторін еластична оболонка, діаметр якої менший діаметра ремонтваного трубопроводу. Спочатку треба переконатись, що пакер можна перемістити до місця встановлення, виконавши тестове його переміщення трубопроводом без рукава. Тоді наносять смолу на зовнішню поверхню рукава і розміщують його на еластичній оболонці пакера, яку заздалегідь обмотують фольгою, що запобігає прилипанню рукава. Пакер запасовують у трубопровід і протягують або проштвхують



1 – відновлений трубопровід; 2 – гумова оболонка; 3 – рукав;
4 – жорстка трубка; 5 – наскрізний дефект; 6 – ролик

Рисунок 10 – Встановлення рукава пакером
Джерело: (Rehabilitación detuberías, 2023)



Рисунок 11 – Пакер для відводів трубопроводів
Джерело: (Pipe Patch now offers Elbow Repairs, 2023)

до місця встановлення рукава. Відтак нагнітають пару, гарячу воду або повітря всередину еластичної оболонки пакера до необхідного тиску. У результаті надування еластична оболонка розширюється, і рукав щільно притискається до внутрішньої стінки відновлюваної ділянки трубопроводу (рис. 10). Після затвердіння смоли стравлюють повітря або випускають воду із еластичної оболонки, і пакер виймають з трубопроводу (Дорошенко, 2015).

Значною проблемою безтраншейних технологій є ремонт відводів, трійників, особливо в місцях під'єднання до трубопроводів будинків. CIPP-методом можна виконати локальний ремонт таких елементів трубопроводу.

Для поміщення рукавів у відводи і притискання їх до внутрішньої стінки пакеери виготовляють криволінійної форми (рис. 11).

Для трійників виготовляють Т-подібні рукави (рис. 12, а), які просочують смолою. Пакеери для таких рукавів містять надувні еластичні

оболонки-відгалуження (рис. 12, б). Т-подібний рукав поміщають на пакер, який протягують або проштовхують до місця ремонтovanого трійника. Тоді пакер позиціонують всередині трійника таким чином, щоб його оболонка-відгалуження була в місці відгалуження трійника. Положення пакера контролюють відеокамерою. У результаті надування пакера відбувається витіснення його оболонки-відгалуження у відгалуження трійника і формування Т-подібного рукава. Коли пакер повністю надутий, Т-подібний рукав щільно притискається до внутрішньої стінки трійника, після чого смола твердне (рис. 12, в). Таким чином відбувається механічне та клейове з'єднання. Після затвердіння смоли повітря з пакеера випускають і видаляють його з трубопроводу (Trenchless Technology for the Rehabilitation of Deteriorated Pipelines, 2006).

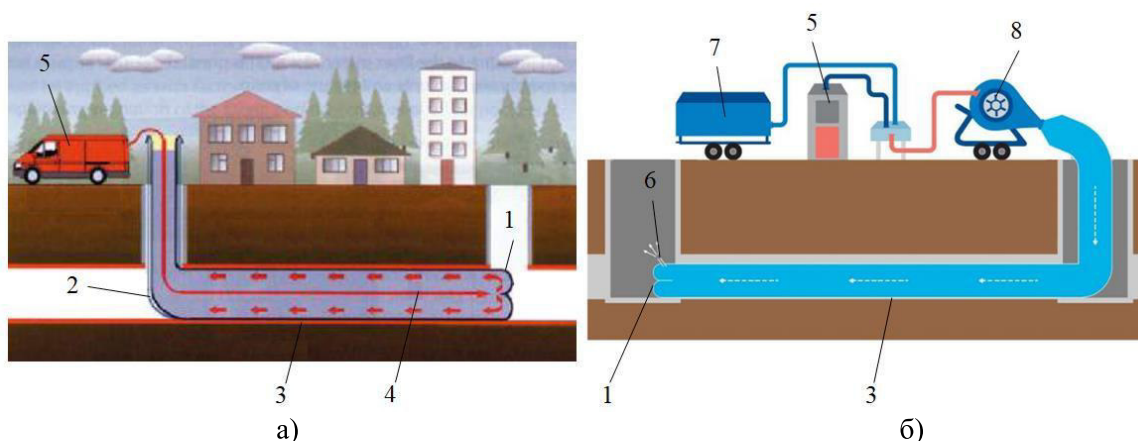
Наступним етапом після поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу є його



а) – T-подібний рукав; б) – пакер для трійників; в) – затверділий T-подібний рукав

Рисунок 12 – Ремонт трійників CIPP методом

Джерело: (Trenchless Technology for the Rehabilitation of Deteriorated Pipelines, 2006, TYGER Patch Tall Lid Pipe Patch System, 2021, TYGER Patch Pipe Patch Tee & Wye Lateral Seal, 2022)



а) – циркуляція води; б) – пакер для трійників;

1 – рукав; 2 – інверсійна труба; 3 – відновлювана ділянка трубопроводу; 4 – шланг подавання гарячої води; 5 – бойлер; 6 – вихід повітря і пари; 7 – компресор; 8 – інверсійний барабан

Рисунок 13 – Схеми подавання теплоносія для затвердіння рукава

Джерело: (Trenchless Technology for the Rehabilitation of Deteriorated Pipelines, 2006, Serajiantehrani, 2021)

затвердіння і створення нової структурної труби у дефектній. Смола, якою просякнутий рукав, може тверднути за температури доквілля або в результаті нагрівання паром, гарячим повітрям чи гарячою водою. Також для твердіння смоли застосовують ультрафіолетове світло. У результаті хімічної реакції, яка відбувається під час твердіння, із рукава та смоли утворюється новий міцний матеріал, який набуває форми труби.

За температури доквілля час затвердіння смоли складає від 2 до 12 годин, тоді як під дією пари, гарячого повітря або гарячої води рукави можуть затвердіти лише за 30 хвилин (Tomczak, 2017).

Для затвердіння рукава після завершення гідростатичної інверсії влаштовують циркуляцію води через бойлер (рис. 13, а). Гаряча вода проходить вздовж усього поміщеного в відновлюваний трубопровід рукава. Щоб це забезпечити, перед вивертанням рукава до заднього

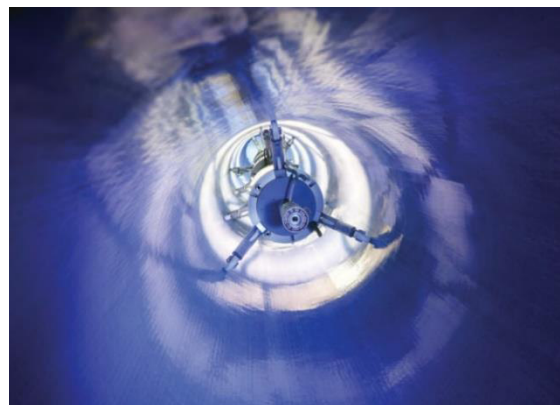
його кінця кріплять шланг, що дає змогу під час інверсії протягнути його всією довжиною відновлюваного трубопроводу. У передній частині шлангу біля місця його кріплення до рукава роблять наскрізні отвори.

Гаряча вода призводить до твердіння термореклавної смоли. Температуру в різних точках на поверхні рукава контролюють термометрами. Коли відбулось твердіння рукава, воду поступово охолоджують і видаляють. Відтак відрізають і видаляють інверсійну трубу (Trenchless Technology for the Rehabilitation of Deteriorated Pipelines, 2006, Kramera, 2018).

Також для затвердіння рукава після його поміщення в відновлювану ділянку трубопроводу можуть парогенератором та компресором нагнати пару і повітря (рис. 13, б). При цьому, як правило, потік пари і повітря нагнітають з одного кінця рукава, тоді він протікає усю довжиною рукава і виходить із протилежного його кінця через спеціальний колектор, де кон-



а)



б)

а) – поміщення пристроями у трубопровід; б) – рух пристрою трубопроводом

Рисунок 14 – Затвердіння рукава ультрафіолетовим світлом

Джерело: (Timberlake, 2015, Rush, 2014)

тролюють температуру та внутрішній тиск (Lanzo Lining Services, Inc., 2010).

Технологія затвердіння рукавів під дією ультрафіолетового опромінювання є відносно новою і має ряд переваг для різних випадків. Роботи виконуються внутрішньотрубними пристроями, які містять колісний рушій і випромінювачі ультрафіолетового світла. Такі пристрої проштовхують або протягують встановленим у відновлюваній ділянці трубопроводу рукавом (рис. 14). У результаті дії ультрафіолетового світла затвердіння відбувається протягом кількох хвилин. Для такого методу рукав повинен бути просякнута спеціальними смолами і повинні бути у наявності фоточутливі ініціатори. Такі рукави можна зберігати та транспортувати без охолодження, і вони залишаються придатними для застосування місяцями (Lanzo Lining Services, Inc., 2010).

Під впливом тепла твердіє епоксидна смола та епоксидний вініловий ефір, поліефірна смола твердіє за температура доквілля, а під впливом ультрафіолетового світла твердіють рукави з скловолокна. Зовнішній шар рукава має напівпористу структуру, що забезпечує добру адгезію до внутрішньої стінки відновлюваного трубопроводу (Najafi, 2021).

Після затвердіння нагріванням нову структурну трубу охолоджують, щоб вона набула температури доквілля. Для цього у відновлений трубопровід нагнітають прохолодне повітря або закачують воду. Тоді зрізають кінці нової структурної труби, а в місцях бокових відводів вирізають круглі отвори дистанційно керованим роботом з фрезою, який обладнують системою відеоспостереження. Наступними етапами є випробування відновленого трубопро-

воду тиском і відеоконтроль, який можна виконати кроулером.

Перевагами CIPP методу є те, що відновлений трубопровід є структурно армованим новим внутрішнім шаром, який здатний: витримувати значні як внутрішні, так і зовнішні навантаження; забезпечувати міцність сильно пошкоджених, дефектних ділянок трубопроводів; усувати витіки та їм запобігати; суттєво продовжувати термін експлуатації трубопроводу; покращувати гідравлічні характеристики трубопроводу. Також рукави можуть проходити відводи трубопроводів з кутом вигину до 45°. Завдяки щільному приклеюванню рукава до внутрішньої стінки відбувається незначне зменшення внутрішнього діаметра відновлюваного трубопроводу.

CIPP методом можна відновлювати трубопроводи великого діаметра. Для цього використовують рукави більшої міцності з підсиленої тканини, вакуумний метод просочування рукава смолою та водяну пару або ультрафіолетове світло для затвердіння рукава.

Недоліками CIPP методу є відносно висока вартість матеріалів, потрібна додаткова техніка (компресори, парогенератори тощо), внутрішня стінка відновлюваного трубопроводу повинна бути добре очищена, є обмеження щодо температури транспортованої речовини, можливе нещільне прилягання рукава до внутрішньої стінки дефектного трубопроводу (особливо у місцях порушень форми поперечного перерізу та на кутах повороту, де можливе утворення гофрів). Також нова структурна труба може лущитись, можливі утворення зморшок, складок або бульбашок (Tomczak, 2017).

Висновки

Вирішити проблему зношеності трубопроводних систем в Україні можливо за умови виконання великих обсягів ремонтних, реноваційних робіт. При цьому запорукою успішної реалізації цього є масштабне застосування безтраншейних технологій, особливо у важкодоступних місцях трубопроводів та у містах.

Виконаний огляд, аналіз двох найпоширеніших методів безтраншейного відновлення трубопроводів SAPL та CIPP дає змогу зорієнтуватись у різноманітті технологій та бути обізнаним для затвердження найприйнятнішого рішення щодо вибору оптимального варіанту. Найсуттєвішим на сьогодні обмеженням щодо застосування цих методів є трубопроводи високого тиску. Однак, матеріали, які застосовують для внутрішньотрубного відновлення трубопроводів, з часом покращуються, що дає змогу підвищувати ефективність методу, суттєво підсилити стінку та забезпечувати довготривалий захист трубопроводів. Якщо матеріал покриття буде бар'єром для проникнення водню в стінку, то такими методами можна буде вирішувати задачі з захисту трубопроводів від водневої крихкості.

Незважаючи на різноманіття безтраншейних технологій відновлення трубопроводів, їх можливості щодо захисту, підсилення як прямолінійних ділянок трубопроводів, так і різноманітних трубопровідних елементів (відводів, трійників) із мінімальними як фінансовими, так і трудовими витратами, на сьогодні існує значний потенціал до їх подальшого розвитку, удосконалення.

Перспективою подальших досліджень є встановлення впливу реновації трубопроводних систем кожними з розглянутих методів на гідравлічну енерговитратність трубопроводів.

Література / References

1. 4 Key Benefits of Robotic Abrasive Blasting. (2015). URL: <https://blog.spongejet.com/4-key-benefits-of-robotic-abrasive-blasting>.

2. Bueno M. Pipe relining continues to thrive and grow. *Trenchless technology. Special supplement*. 2014. Vol. 6.

3. Chuk C., Urgessa G., Thippeswamy H. Numerical analysis of stresses for cured-in-place pipe linings. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2011. No 115. P. 283-293. DOI: 10.2495/FSI110241.

4. Doroshenko Ya. V. *Construction main pipelines*. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2009.

5. Doroshenko Ya. V. *Construction and repair of concentrated facilities of gasand oil pipelines*. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2015.

6. Doroshenko Ya.V., Karpash M.O., Stetsiuk S.M., Babelskyi R.M., Volovetskyi V.B. Prospects and problematic issues of the formation and development of hydrogen energy in Ukraine. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2022, No 1(82). P. 7-33. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-1(82)-7-33.

7. Doroshenko Y., Zapukhliak V., Poliarush K., Stasiuk R., Bagriy S. Development of "pulling pig P" pipeline communications. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 2(1). P. 28-38. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164351.

8. Elephant Pipe Relining. (2023). URL: <https://www.elephantpiperelining.com.au/pipe-relining-services/recent-projects>.

9. EPA 832-F-99-032 "Collection Systems O & M Fact Sheet. Trenchless Sewer Rehabilitation". United States Environmental Protection Agency. 1999.

10. Hicks J., Kaushal V., Jamali K. A Comparative Review of Trenchless Cured-in-Place Pipe (CIPP) With Spray Applied Pipe Lining (SAPL) Renewal Methods for Pipelines. *Water*, 2022. No 4. P. 1-7. DOI: 10.3389/frwa.2022.904821.

11. Internal Pipe Cleaning Equipment. (1996-2023). URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/internal-pipe-cleaning-equipment-9885610212.html>.

12. Kozman D.P. Evaluation of Cured-in-Place Pipe Allows Structural Renewal of Drinking Water Pipe. *R S Technik LLC: Materials of the scientific conference with international participation*. 2013. P. 1-6.

13. Kramera S., Liub J., Provencioc G. Advantages and Disadvantages of Trenchless Construction Approaches Compared to the Traditional Open Cut Installation of Underground Utility Systems. *Creative Construction Conference (Ljubljana): Materials of the scientific conference with international participation*. 2018. pp. 129-138. DOI: 10.3311/CCC2018-018.

14. Kristowskia A., Grzyła B., Kurpińska M., Pszczoła M. The rigid and flexible road pavements in terms of life cycle costs. *Creative Construction Conference (Ljubljana): Proceedings of the Conference*. 2018. P. 1-8. DOI: 10.3311/CCC2018-030.

15. Lanzo Lining Services, Inc. *Engineering Design Guide For Rehabilitation With Cured-In-Place Pipe* (2nd ed.). 2010. Florida.

16. Lee L., Estrada H., Baumert M. Time-dependent liability analysis of FRP rehabilitated pipes. *Journal of Composites for Construction* 2010. No 14(13), P. 272-279. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000075.
17. Lichtbuer G. Integrated cost comparative framework for trenched and trenchless techniques in the Netherlands. *Master's Thesis Internship*, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Netherlands, 2016.
18. Mainak M.P., Arohi K.M. Trenchless Technology. *Civil Engineering Systems and Sustainable Innovations*. 2015. P. 156-163.
19. Marcino S. Structural Lining for Water Mains. *PA-AWWA 67th Annual Conference: Materials of the scientific conference with international participation* Hershey: American Water Works Association, 2015. P. 1-22.
20. Marlow D., Gould S., Lane B. An expert system for assessing the technical and economic risk of pipe rehabilitation options. *Expert Systems With Application*. 2015. No 42(22). P. 8658-8668. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.07.020.
21. Matkivskiy S., Kondrat O. The influence of nitrogen injection duration at the initial gas-water contact on the gas recovery factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. No 1(6 (109)). P. 77-84. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224244.
22. Mifek R. Rehabilitation of Sewerage System Structures. *9th technical conference for doctoral study: Materials of the scientific conference with international participation*. 2007. P. 231-232. Juniorstav.
23. Modricker O. *Determining trenchless renewal options using CCTV information*. Gipenz: Project Max Ltd, 2023.
24. Najafi M., Gokhale S. *Trenchless Technology Pipeline and Utility Design, Construction and Renewal*. 2nd Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2021.
25. Normalización técnica de la EAAB-ESP: NS-058, NS-060, NS-061. Aspectos técnicos para inspección y mantenimiento de redes de alcantarillado. Criterios de diseño de anclajes en redes de acueducto y alcantarillado. Aspectos técnicos para la rehabilitación de redes y estructura de alcantarillado. *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá-ESP*. 2001.
26. Ogden J., Myers Ja., Scheitrum D., McDonald Z., Miller M. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: Insights from the literature. *Energy Policy*. 2018. No 115. P. 317-329. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.12.049.
27. Pipe coater. (n.d.). URL: <https://airblastaustralia.com/product/pipecoater-iii300-for-5-12-id-pipes/>.
28. Pipe Coating Services. 2020. URL: <https://m.indiamart.com/proddetail/pipe-coating-services-2851014554197.html>.
29. Pipe Patch now offers Elbow Repairs. (n.d.). URL: <https://www.s1eonline.com/articles/2013/06/17/source-1-environmentals-pipepatch-recognized-icc-es>.
30. Poliarush K.A. Engineering and technology development of trenchless reconstruction of gas and heat pipelines. *Candidate of Technical Sciences thesis*, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine. 2020.
31. Poliarush K.A., Doroshenko Ya.V., Tykhonov S.I., Babii A.R. Modern technologies of trenchless repair of heating and gas networks. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2016. No 1(58), P. 41-51.
32. Project of the Year Rehabilitation Runner. 2020. URL: <https://trenchlesstechnology.com/2020-trenchless-technology-project-of-the-year-rehabilitation-runner-up/>.
33. Rehabilitación de tuberías. 2023. URL: <https://www.limpiezasjavea.com/en/sistema-packer-de-reparacion-de-tuberias-sin-obra/>.
34. Rudnieva, Priadko Yu., Priadko M., Tonkacheiev H. Features and prospects for the use of technologies for strengthening building structures with composite FRP-materials during reconstruction of buildings. *Building constructions. Theory and practice*. 2020. No 7, P. 12-22. DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.
35. Rush J. Trenchless Pipe Relining Continues to Thrive. *Trenchless technology*, Special supplement, Vol. 8-10. 2014.
36. Serajiantehrani R., Najafi M., Mohammadi M., Kaushal V., Korkey S.. Construction Cost Analysis of Trenchless Cured-in-place Pipe and Spray-applied Pipe Linings Rehabilitation Methods in Gravity Conveyance Conduits. *Construction and Rehabilitation: Materials of the scientific virtual conference with international participation*. 2021. P. 210-220). American Society of Civil Engineers.
37. Soldati S. Trenchless pressure pipe rehabilitation. *Facers Annual Meeting: Materials of the annual conference*. Florida: Florida Association of Counties, 2021. P. 1-37.
38. Spin-Blast. 2012-2017. URL: <https://pavalex.eu/spin-blast-sb-836#prettyPhoto>.
39. The Best Trenchless Sewer Pipe Repair in Atlanta. (n.d.). URL: <https://northgeorgiapipelining.com/services/trenchless-sewer-repair-atlanta-ga/>.

40. The Safety of CIPP. URL: <https://trenchlesstechnology.com/the-safety-of-cipp/>.
41. Timberlake M. The pipe that came in from the cold. *Trenchless Word*. July/August 2023. P. 14-15.
41. Tomczak E., Zielińska A. Example of sewerage system rehabilitation using trenchless technology. *ECOL CHEM ENG S.*, 2017. No 24(3). P. 405-416. DOI: 10.1515/eces-2017-0027.
42. Tracked mobil erobot for pipeline inspection with an active adaptation system. 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NKH9povlrsw>.
43. Trenchless Technology. 2023. URL: <https://lamstt.org/en/trenchless-technology>.
44. Trenchless Technology for the Rehabilitation of Deteriorated Pipelines. 2006. URL: <https://www.sit.engineersaustralia.org.au/resource-centre/resource/trenchless-technology-rehabilitation-deteriorated-pipelines>.
45. TYGER Patch Pipe Patch Tee & Wye Lateral Seal. 2022. URL: <https://www.s1eonline.com/pipepatch/product-line/tee-wye-pipepatch-lateral-seal-system>.
46. TYGER Patch Tall Lid Pipe Patch System. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fo96flop1qo>.
47. Tykhonov S.I., Doroshenko Ya.V., Poliarush K.A. Technologies of intra-pipe inspection and repair of hard-to-reach sections of gas and oil pipelines. *Scientific Herald*. 2015. No 1(38). P. 83-94.
48. Video Sewer Inspections across Chicagoland. 2023. URL: <https://americantrenchlesstechnologies.com/video-sewer-inspections/>.
49. Volovetskyi V.B., Doroshenko Ya.V., Stetsiuk S.M., Matkivskyi S.V., Shchyrba O.M., Femiak Y.M., Kogut, G.M. (2022). Development of foam-breaking measures after removing liquid contamination from wells and flow lines by using surface-active substances. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. No 114(2). P. 67-80. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2157.