

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОНДАРЕНКО Роберт Вікторович

УДК 622.691.4

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ
ВАЖКОДОСТУПНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

Спеціальність 185 – Нафтогазова інженерія та технології
Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Р. В. Бондаренко

Науковий керівник **Дорошенко Ярослав Васильович**, доктор технічних наук,
професор

Івано-Франківськ 2026

АНОТАЦІЯ

Бондаренко Р. В. Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному вивченню методів внутрішньотрубного ремонту трубопроводів газових і теплових мереж. Теоретичним та експериментальним дослідженням процесу доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи у важкодоступне місце дефекту трубопроводу, розташоване за крутовигнутим відводом чи трійником. Розробленню техніки та технології ремонту локальних дефектів стінки труби трубопроводів розташованих у важкодоступних місцях.

Стан газотранспортної системи, трубопровідних мереж України різноманітного призначення, зокрема газо-, теплопостачання і трубопровідного транспорту загалом характеризується високим рівнем зносу, що зумовлено тривалим терміном експлуатації, інтенсивним розвитком корозійних процесів, а також поступовою деградацією матеріалів труб і захисних покриттів. Більшість трубопроводів експлуатується понад 50 років, мають велику кількість корозійних пошкоджень, дефекти ізоляційного покриття, стоншену стінку, локальні розгерметизації та внутрішні відкладення. Такий технічний стан лінійних споруд трубопровідного транспорту, які мають тривалий термін експлуатації, призводить до все частіших аварій, витоків газу і теплоносія, втрат енергоносіїв, забруднення довкілля та перебоїв у життєзабезпеченні населених пунктів. Традиційні траншейні методи моніторингу, ремонту трубопроводів потребують значних фінансових і трудових ресурсів, які на сьогодні обмежені у операторів газотранспортних систем. Також вони передбачають виконання масштабних земляних робіт, що часто є

технічно неможливим або соціально неприйнятним у міських умовах газорозподільних мереж. Особливо це стосується ділянок трубопроводів, які мають тривалий термін експлуатації і розташовані під автомобільними дорогами і залізницями, каналами, щільною міською забудовою, інженерними спорудами, а також у тунелях, технічних колекторах чи на територіях з обмеженим правовим або фізичним доступом. У ряді випадків розкопування таких ділянок газорозподільних мереж є технічно неможливим або забороненим з міркувань безпеки, охорони культурної спадщини чи збереження функціонування критичних об'єктів тощо. Такі ділянки трубопроводів належать до категорії важкодоступних, де моніторинг, виконання традиційних ремонтних робіт або взагалі неможливі, або економічно невиправдані. Тому критично важливим стає розроблення технологій, які здатні виконати моніторинг, локальний ремонт трубопроводів, які мають тривалий термін експлуатації, зсередини, без потреби у виконанні земляних робіт. В зв'язку з цим внутрішньотрубний моніторинг і ремонт набувають особливої актуальності як ефективний напрям розвитку безтраншейних технологій, що дає змогу мінімізувати втручання, скоротити вартість і терміни ремонтних робіт, підвищити надійність важкодоступних ділянок газотранспортних систем, які мають тривалий термін експлуатації, та зменшити кількість витоків.

Незважаючи на наявність низки зарубіжних і вітчизняних рішень, проблематика доставки, позиціонування та встановлення ремонтних систем у важкодоступних місцях трубопроводів газотранспортних систем залишається недостатньо вирішеною. Особливо для важкодоступних ділянок трубопроводів, які мають тривалий термін експлуатації, і розташовані за крутовигнутими відводами та трійниками трубопроводів. Це зумовлює необхідність подальших наукових пошуків у напрямі розроблення і вдосконалення адаптованих до складної геометрії міського трубопровідного транспорту технологій локального внутрішньотрубного ремонту.

За результатами аналізу існуючих технологій безтраншейної реновації трубопроводів, встановлено, що поширені технології, зокрема “труба в трубі”, SAPL і CIPP ефективні тільки для довгомірних ділянок газових і теплових мереж,

які зазнали значного зносу внаслідок тривалого терміну експлуатації і не містять крутовигнутих відводів, трійників тощо. Крім того такі технології малопридатні для локальних ремонтів ділянок газових мереж, які внаслідок розвитку корозійних процесів і деградації матеріалів зазнали місцевих пошкоджень. Технології внутрішньотрубного локального ремонту дефектів стінки трубопроводів на сьогодні існують, однак засоби доставки ремонтних систем у такому випадку засновані на механічному протягуванні або проштовхуванні, і їх не можливо застосувати, якщо трубопровід містить крутовигнутий відвід або трійник. А тому проблема доставки ремонтних систем у важкодоступні місця трубопроводів за крутовигнутий відвід або трійник залишається на сьогодні нерозв'язаною.

У дисертаційній роботі вирішити таку проблему запропоновано з допомогою поршня із силіконового компаунда. Запропоновано ідею доставляти ним ремонтні системи у важкодоступні деградовані місця трубопроводів за крутовигнутий відвід або трійник. При цьому для виконання такої операції поршень має мати наскрізний осьовий отвір, так як в момент його зупинки одразу за місцем локального дефекту стінки труби не можливо одразу зупинити подавання повітря у запоршневий простір. Щоб визначити чи є можливість поршнем із наскрізним осьовим отвором доставляти ремонтні системи у важкодоступні деградовані місця трубопроводів за крутовигнутий відвід або трійник виконано аналітичні, чисельні та експериментальні дослідження, розроблено відповідну технологію та здійснено її експериментальну і промислову апробацію.

Для аналітичних та чисельних досліджень процесу доставки ремонтної системи трубопроводом до місця локального дефекту, спричиненого корозійними процесами та деградацією стінки труби поршнем з осьовим отвором його розділено на три етапи:

- протягування поршнем під тиском повітря ремонтної системи сталевим трубопроводом до місця дефекту;
- повне розмотування прикріпленої до валу барабана гнучкої трубки і гальмування поршня безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби (до припинення подавання повітря компресором);

- припинення подавання повітря компресором. Тиск повітря у запоршневому просторі зменшується до нуля, що призводить до розвантаження системи.

Аналітичні дослідження процесу доставки ремонтної системи поршнем із осьовим отвором до місця локального дефекту трубопроводу виконано за спеціально для цього розробленою механіко-математичною моделлю. Для чого сформульовано та розв'язано контактні задачі про фрикційну взаємодію ремонтної системи “гнучка трубка – ремонтний бандаж – поршень” з сталеною трубою на усіх трьох етапах доставки. Отримані розв'язки дали змогу встановити закономірності розподілу осьових сил, напружень, деформацій та видовжень ремонтної системи під час її доставки до місця локального дефекту стінки труби. Такі результати дають змогу здійснювати оцінювання міцності ремонтної системи та визначити місцезнаходження ремонтного бандажа після гальмування поршня з осьовим отвором гнучкою трубою одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу у важкодоступному місці (здійснювати позиціювання ремонтного бандажа). Встановлено, що для трубопроводу діаметром 50 мм мінімальне допустиме значення діаметра осьового отвору у поршні, при якому зберігається цілісність конструкції, становить 5 мм. При цьому для практичних застосувань рекомендовано, щоб діаметр осьового отвору в поршні був в межах від 10 мм до 10,5 мм. За такого діаметра осьового отвору в поршні ремонтний бандаж можна доставляти на дистанцію від 80 м до 100 м з достатньою точністю позиціювання від 15 мм до 20 мм.

Для аналізу газодинамічних процесів, які відбуваються під час доставки поршнем з осьовим отвором ремонтної системи до локального дефекту трубопроводу, розташованого у важкодоступному місці, за крутовигнутим відводом, застосовано CFD-моделювання, яке ґрунтується на використанні газодинамічних моделей та виконанні газодинамічного розрахунку на основі рівнянь газової динаміки. Таким способом змодельовано газодинамічні процеси, що відбуваються під час руху поршня відводом трубопроводу та його гальмування безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби, з урахуванням розподілу тиску, швидкості потоку та інших параметрів, описаних рівняннями

газової динаміки. Встановлено, що на вході в осьовий отвір поршня відбувається різке зменшення тиску, розподіл якого всередині отвору є рівномірним. При цьому тиск, який виникає у цій зоні не забезпечує виникнення помітних радіальних складових навантаження, здатних викликати щільне прилягання поршня до внутрішньої поверхні стінки трубопроводу, а тому не чинить істотного впливу на силу тертя та динаміку його руху трубопроводом.

За результатами CFD-моделювання, виконаного на основі газодинамічних моделей і газодинамічного розрахунку з використанням рівнянь газової динаміки, визначено закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску на ньому. Так, для етапу, коли поршень загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки труби (до вимкнення компресора), у разі збільшення діаметра осьового отвору в ньому від 6 мм до 10 мм величина перепаду тиску на ньому зменшується від 91742 Па до 22085 Па, тоді як подальше збільшення діаметра осьового отвору до 14 мм зменшує перепад тиску на ньому до 3848 Па. Такі закономірності однакові для випадку руху поршня як прямолінійними, так і криволінійними ділянками.

Для експериментальних досліджень розроблено технологію виготовлення і виготовлено поршні із осьовим отвором із силіконового компаунда. Така технологія передбачає лиття силіконового компаунда у надруковані на 3D принтері ливарні форми. При цьому для формування осьового отвору та отворів під кріплення тяг передбачено поміщення в ливарну форму циліндричного осердя та спиць. Експериментальні дослідження на спеціально розроблених і змонтованих установках з скляних труб і фасонних елементів засвідчили, що ремонтну систему можна протягнути поршнем з осьовим отвором трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід, трійник. Також розроблено і змонтовано аналогічні експериментальні установки з металевих труб і фасонних елементів, що дало можливість визначити закономірності зміни тиску у запоршневому просторі під час доставки поршнем з осьовим отвором ремонтної системи до місця локального дефекту стінки труби, яке знаходиться за крутовигнутим відводом, трійником.

За допомогою такої експериментальної установки встановлено закономірності зміни тиску на початку трубопроводу під час доставки ремонтної системи поршнем із осьовим отвором до місця важкодоступного локального дефекту стінки труби.

За визначеним чисельно та експериментально перепадом тиску на поршні для випадків його руху крутовигнутим відводом та зупинки одразу за місцем локального дефекту стінки труби, до припинення подавання повітря, визначено рушійну силу, яка діє на поршень та встановлено закономірності впливу на її величину діаметра осьового отвору в поршні. Встановлено, що коли поршень перебуває на прямолінійній ділянці трубопроводу у разі збільшенні діаметра осьового отвору в ньому від 6 мм до 10 мм величина рушійної сили зменшується від 170,8 Н до 39,7 Н. У разі подальшого збільшення діаметра осьового отвору в поршні до 14 мм рушійна сила зменшується до 6,6 Н. Одержані закономірності показали, що саме діаметр осьового отвору в поршні є ключовим фактором, який визначає динаміку руху поршня трубопроводом та його здатність долати фасонні елементи, зокрема крутовигнуті відводи. Також встановлено, що за значних діаметрів осьового отвору в поршні (більше 10,5 мм) величина рушійної сили, яка діє на нього, є недостатньою для забезпечення його стабільного руху трубопроводом, що істотно знижує здатність долати крутовигнуті відводи та доставляти ремонтні елементи у важкодоступні місця трубопроводів. Зокрема, за діаметра осьового отвору 14 мм зафіксовано застрягання поршня у крутовигнутому відводі експериментальної установки. Водночас, зменшення діаметра осьового отвору призводить до істотного зростання навантаження на гнучку трубку, коли поршень зупинився безпосередньо за місцем локального дефекту стінки, до припинення подавання повітря компресором. Так, при діаметрі осьового отвору 6 мм величина розтягувальної сили, що виникає в гнучкій трубці, сягала 170,8 Н, що створює високий ризик її пошкодження або навіть руйнування. Аналітично ж встановлено, що мінімальне допустиме значення діаметра осьового отвору у поршні, при якому зберігається цілісність конструкції, становить 5 мм.

На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено технологію внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби газових і теплових мереж трубопровідного транспорту, які мають тривалий термін експлуатації, у важкодоступних місцях “Тяговий поршень^Б”. За цією технологією доставка ремонтної системи до локального дефекту стінки труби у важкодоступне місце здійснюється поршнем із осьовим отвором із силіконового компаунда. Для зупинки такого поршня, коли він буде одразу за місцем локального дефекту стінки труби до нього треба прикріпити гнучку трубку. При цьому протилежний кінець такої трубки треба міцно закріплений до попередньо поміщеного у герметичну циліндричну камеру валу барабана. Під час руху поршня трубопроводом гнучка трубка буде розмотуватись з валу барабана. Крім того ще одним функціональним призначенням гнучкої трубки є подавання повітря у еластичну оболонку ремонтної системи. Під тиском такого повітря еластична оболонка буде роздуватись і притискати до внутрішньої стінки трубопроводу в місці локального дефекту просякнутий спеціальною епоксидною смолою ремонтний бандаж. Під час експериментальних випробувань та промислової апробації підтверджено можливість ремонту локального дефекту стінки труби у важкодоступному місці, за крутовигнутим відводом, трійником розробленою технологією “Тяговий поршень^Б”.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у виявленні якісно нових закономірностей впливу рушійної сили, сил опору та діаметра осьового отвору поршня на динаміку доставки ремонтної системи до місця локального дефекту трубопроводом зі змінною внутрішньою конфігурацією та визначається такими положеннями.

Вперше встановлено закономірності впливу рушійної сили, що виникає під час протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи сталевим трубопроводом на величину напружень, деформацій, видовжень конструктивних елементів, що дозволило оцінити їх міцність та встановити місцезнаходження ремонтного бандажа після гальмування поршня за місцем локального дефекту стінки труби.

Вперше встановлено закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску та рушійну силу, яка діє на нього, що дало змогу встановити оптимальні параметри конструкції поршня для забезпечення надійної доставки ремонтної системи у важкодоступне місце трубопроводу.

Вперше встановлено закономірності впливу фізико-механічних властивостей матеріалу поршня з осьовим отвором із пружного матеріалу на його напружений стан, розподіл контактних сил і величину запоршневого тиску під час руху відводом трубопроводу, що дозволило встановити, за яких умов він не буде застрягати у таких елементах трубопроводів.

Практичним значенням розроблених технологій полягає в тому, що виконані в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження дали змогу розробити техніку та технологію внутрішньотрубного ремонту трубопровідних мереж протягуванням поршнем з осьовим отвором у важкодоступну ділянку сталевого трубопроводу ремонтної системи – “Тяговий поршень^Б”. Запропонована технологія забезпечує можливість швидкої доставки ремонтного бандажа у важкодоступне місце трубопроводу, розташоване за крутовигнутим відводом чи трійником і встановити його в місці локального дефекту стінки труби. Використання цього підходу дозволяє суттєво скоротити обсяги підготовчих операцій, спростити проведення робіт в ускладнених умовах, зменшити витрати на ремонт та час робочого процесу.

За результатами виконаних досліджень розроблено технологічну інструкцію з внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів. Розроблена технологія внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж – “Тяговий поршень^Б” промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

Ключові слова: трубопровідний транспорт, газотранспортна система, газові мережі, газорозподільні мережі, теплові мережі, трубопровід, тривалий термін експлуатації, моніторинг, корозійні процеси, деградація, ремонт, поршень з

осьовим отвором, газодинамічні моделі, газодинамічний розрахунок, рівняння газової динаміки.

ANNOTATION

R. Bondarenko. Development of an in-pipe repair technology for hard-to-reach sections of pipeline networks. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 185 – Oil and Gas Engineering and Technology. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The dissertation is devoted to a comprehensive study of in-pipe repair methods for pipelines of gas and district heating networks. It includes theoretical and experimental investigations of the process of delivering a repair system by means of a pig with an axial opening to a hard-to-access defect location in a pipeline, situated downstream of a sharp bend or a tee. The work also focuses on the development of equipment and technologies for repairing local defects in the pipe wall of pipelines located in hard-to-access areas.

The condition of Ukraine's gas transmission system and pipeline networks of various purposes, particularly gas and heat supply systems and pipeline transport in general, is characterized by a high level of wear. This is caused by long-term operation, intensive development of corrosion processes, and the gradual degradation of pipe materials and protective coatings. Most pipelines have been in operation for more than 50 years and exhibit a large number of corrosion damages, defects in insulation coatings, wall thinning, local loss of tightness, and internal deposits. Such a technical condition of linear pipeline transport facilities with long service lives leads to increasingly frequent accidents, gas and heat carrier leaks, energy losses, environmental pollution, and disruptions in the life-support systems of populated areas.

Traditional trench-based methods for pipeline monitoring and repair require significant financial and labor resources, which are currently limited for gas transmission system operators. They also involve large-scale earthworks, which are often technically

impossible or socially unacceptable in urban gas distribution networks. This is especially true for pipeline sections with long service lives that are located beneath highways and railways, canals, dense urban development, engineering structures, as well as in tunnels, utility corridors, or areas with restricted legal or physical access. In a number of cases, excavation of such sections of gas distribution networks is technically impossible or prohibited for reasons of safety, protection of cultural heritage, or preservation of the operation of critical facilities.

Such pipeline sections belong to the category of hard-to-access areas, where monitoring and the performance of traditional repair works are either impossible or economically unjustified. Therefore, the development of technologies capable of performing monitoring and local repair of long-operated pipelines from the inside, without the need for excavation works, becomes critically important. In this context, in-pipe monitoring and repair gain particular relevance as an effective direction in the development of trenchless technologies, enabling the minimization of intervention, reduction of costs and repair time, improvement of the reliability of hard-to-access sections of long-operated gas transmission systems, and a decrease in the number of leaks.

Despite the availability of a number of foreign and domestic solutions, the issue of delivering, positioning, and installing repair systems in hard-to-access locations of gas transmission pipelines remains insufficiently resolved. This is particularly true for hard-to-access pipeline sections with long service lives that are located downstream of bends and tees. This necessitates further scientific research aimed at the development and improvement of technologies for localized in-pipe repair that are adapted to the complex geometry of urban pipeline transport systems.

Based on an analysis of existing trenchless pipeline rehabilitation technologies, it has been established that widely used methods, such as pipe-in-pipe, SAPL, and CIPP are effective only for long pipeline sections of gas and heat networks that have experienced significant wear due to prolonged operation and do not contain sharp bends, tees, or similar fittings. Moreover, these technologies are poorly suited for localized repairs of gas pipeline sections that have suffered local damage as a result of corrosion processes and material degradation.

Technologies for localized in-pipe repair of pipeline wall defects do exist; however, the delivery of repair systems in such cases is based on mechanical pulling or pushing, which makes their application impossible when the pipeline includes a sharp bend or a tee. Therefore, the problem of delivering repair systems to hard-to-access pipeline locations located beyond sharp bends or tees remains unresolved at present.

In the dissertation, this problem is proposed to be solved by using a pig made of a silicone compound. The idea is to use this pig to deliver repair systems to hard-to-access degraded sections of pipelines located downstream of a bend or a tee. To perform such an operation, the pig must have a through axial opening, since at the moment it stops immediately after the location of a local pipe wall defect, it is not possible to instantly stop the supply of air into the space behind the pig.

To determine whether a pig with a through axial opening can deliver repair systems to hard-to-access degraded pipeline sections located beyond a bend or a tee, analytical, numerical, and experimental studies were carried out. An appropriate technology was developed and subjected to experimental and industrial validation.

For analytical and numerical studies of the process of delivering a repair system through a pipeline to the location of a local defect caused by corrosion processes and pipe wall degradation using a pig with an axial opening, the process was divided into three stages:

- pulling the repair system by the pig under compressed air pressure through a steel pipeline to the defect location;
- complete unwinding of the flexible tube attached to the drum shaft and braking of the pig directly downstream of the local pipe wall defect (before the compressor air supply is stopped);
- stopping the air supply from the compressor, whereby the air pressure in the space behind the pig decreases to zero, resulting in unloading of the system.

Analytical studies of the process of delivering a repair system to the location of a local pipeline defect by means of a pig with an axial opening were carried out using a mechanical–mathematical model specially developed for this purpose. For this, contact problems describing the frictional interaction of the repair system “flexible tube – repair

sleeve – pig” with the steel pipe were formulated and solved for all three stages of delivery. The obtained solutions made it possible to determine the patterns of distribution of axial forces, stresses, deformations, and elongations of the repair system during its delivery to the location of the local pipe wall defect.

These results enable the assessment of the strength of the repair system and the determination of the position of the repair sleeve after braking of the pig with an axial opening by the flexible tube immediately down of the local pipe wall defect in a hard-to-access location (i.e., positioning of the repair sleeve). It was established that for a pipeline with a diameter of 50 mm, the minimum permissible diameter of the axial opening in the pig that ensures structural integrity is 5 mm. For practical applications, it is recommended that the diameter of the axial opening in the pig be in the range of 10 mm to 10.5 mm. With such an axial opening diameter, the repair sleeve can be delivered over a distance of 80 m to 100 m with a positioning accuracy of 15 mm to 20 mm.

To analyze the gas-dynamic processes occurring during the delivery of a repair system by a pig with an axial opening to a local pipeline defect located in a hard-to-access area downstream of a bend, CFD modeling was applied. This modeling was based on the use of gas-dynamic models and the performance of gas-dynamic calculations using the equations of gas dynamics. In this way, the gas-dynamic processes that occur during the motion of the pig through a pipeline bend and its braking immediately down of the local pipe wall defect were simulated, taking into account the distributions of pressure, flow velocity, and other parameters described by the equations of gas dynamics.

It was established that at the entrance to the axial opening of the pig, a sharp decrease in pressure occurs, while the pressure distribution inside the opening is uniform. The pressure arising in this zone does not generate significant radial load components capable of causing tight contact between the pig and the inner surface of the pipeline wall and, therefore, does not have a significant effect on the friction force or on the dynamics of pig motion through the pipeline.

Based on the results of CFD modeling performed using gas-dynamic models and gas-dynamic calculations based on the equations of gas dynamics, the relationships describing the influence of the diameter of the axial opening in the pig on the pressure

drop across it were determined. Specifically, for the stage in which the pig is braked immediately downstream of the local pipe wall defect (before the compressor is switched off), increasing the diameter of the axial opening from 6 mm to 10 mm reduces the pressure drop across the pig from 91,742 Pa to 22,085 Pa, while a further increase in the axial opening diameter to 14 mm reduces the pressure drop to 3,848 Pa. These patterns are the same for pig motion along both straight and curved pipeline sections.

Based on the pressure drop across the pig determined numerically and experimentally for the cases of its motion through a bend and its stopping immediately downstream of a local pipe wall defect, prior to termination of the air supply, the driving force acting on the pig was determined, and the relationships governing the influence of the axial opening diameter in the pig on the magnitude of this force were established. It was found that when the pig is located in a straight pipeline section, increasing the diameter of the axial opening from 6 mm to 10 mm reduces the driving force from 170.8 N to 39.7 N. With a further increase in the axial opening diameter to 14 mm, the driving force decreases to 6.6 N.

The obtained relationships demonstrate that the diameter of the axial opening in the pig is the key factor determining the dynamics of pig motion through the pipeline and its ability to pass through fittings, in particular sharp bends. It was also established that for large axial opening diameters in the pig (greater than 10.5 mm), the driving force acting on it is insufficient to ensure stable motion through the pipeline, which significantly reduces its ability to negotiate sharp bends and to deliver repair elements to hard-to-access pipeline locations. In particular, for an axial opening diameter of 14 mm, jamming of the pig in a sharp bend of the experimental setup was observed.

At the same time, a decrease in the axial opening diameter leads to a significant increase in the load on the flexible tube when the pig stops immediately downstream of the local pipe wall defect, prior to termination of the air supply by the compressor. Thus, at an axial opening diameter of 6 mm, the tensile force arising in the flexible tube reached 170.8 N, creating a high risk of its damage or even failure. Analytical analysis established that the minimum permissible diameter of the axial opening in the pig that ensures structural integrity is 5 mm.

Based on the results of theoretical and experimental studies, a technology has been developed for the in-pipe repair of local wall defects in pipelines of gas and heat supply networks of pipeline transport systems that have a long-term operation and are located in hard-to-reach areas, referred to as “Pulling Pig^B.” According to this technology, delivery of the repair system to a local pipe wall defect in a hard-to-reach location is carried out by means of a pig with an axial hole made of a silicone compound. To stop the pig when it is positioned immediately downstream of the local pipe wall defect, a flexible tube must be attached to it. The opposite end of this tube must be securely fixed to a drum shaft previously placed in a sealed cylindrical chamber. As the pig moves through the pipeline, the flexible tube unwinds from the drum shaft.

In addition, another functional purpose of the flexible tube is to supply air to the elastic shell of the repair system. Under the pressure of this air, the elastic shell expands and presses a repair bandage impregnated with a special epoxy resin against the inner wall of the pipeline at the location of the local defect.

Experimental testing and industrial trials have confirmed the feasibility of repairing local pipe wall defects in hard-to-reach locations, such as beyond sharply curved bends and tees using the developed “Pulling Pig^B” technology.

The scientific novelty of the obtained results lies in identifying qualitatively new patterns in the influence of the driving force, resistance forces, and the diameter of the pig axial hole on the dynamics of delivering the repair system to the location of a local defect through a pipeline with a variable internal configuration. This novelty is defined by the following provisions.

For the first time, the relationships governing the influence of the driving force arising during the pulling of a repair system by a pig with an axial hole through a steel pipeline on the magnitude of stresses, deformations, and elongations of structural elements have been established. This made it possible to assess their strength and to determine the position of the repair bandage after the pig is braked downstream of the local pipe wall defect.

For the first time, the relationships governing the influence of the axial hole diameter in the pig on the pressure drop and the driving force acting on it have been

established, which made it possible to determine the optimal design parameters of the pig to ensure reliable delivery of the repair system to hard-to-reach sections of the pipeline.

For the first time, the relationships governing the influence of the physicomaterial properties of the elastic material of the pig with an axial hole on its stress state, the distribution of contact forces, and the magnitude of the pressure behind the pig during its movement through pipeline bends have been established. This made it possible to determine the conditions under which the pig will not become stuck in such pipeline elements.

The practical significance of the developed technologies lies in the fact that the theoretical and experimental studies carried out in the dissertation made it possible to develop equipment and a technology for in-pipe repair of pipeline networks by pulling a repair system into a hard-to-reach section of a steel pipeline using a pig with an axial hole, referred to as “Pulling Pig^B”.

The proposed technology ensures rapid delivery of a repair bandage to hard-to-reach pipeline sections located beyond sharply curved bends or tees and enables its installation at the site of a local pipe wall defect. The application of this approach makes it possible to significantly reduce the scope of preparatory operations, simplify repair work under challenging conditions, and decrease both repair costs and overall process duration.

Based on the results of the conducted studies, a technological instruction for the in-pipe repair of hard-to-reach defective sections of pipelines has been developed. The developed in-pipe repair technology for hard-to-reach sections of pipeline networks “Pulling Pig^B” has been industrially tested and implemented at the JV “Kyiv Heating Networks” of the ME “Kyivteploenergo” RTM “Pechersk.”

Keywords: pipeline transport, gas transmission system, gas networks, gas distribution networks, district heating networks, pipeline, long-term operation, monitoring, corrosion processes, degradation, repair, pig with an axial hole, gas-dynamic models, gas-dynamic calculation, equation of gas dynamics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

Статті у наукометричних базах:

1. **Bondarenko R.**, Doroshenko Y. Numerical-experimental analysis of the process of delivering a repair system by a bypass pig to a hard-to-reach place of the pipeline. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2025. 130(1). P. 14-28. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2799>. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав CFD моделювання газодинамічних процесів, які відбувається у трубопроводі під час протягування поршнем з різним діаметром осьового отвору в ньому ремонтної системи його прямолінійними ділянками та відводом. Брав участь у розробленні технології та виготовленні поршнів з наскрізним осьовим отвором, лабораторних експериментальних дослідженнях протягування ними ремонтної системи трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід. Встановив закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску і діючу на нього рушійну силу. Брав участь у підготовці статті до публікації.

2. Stetsiuk S., **Bondarenko R.**, Doroshenko Y., Holubenko V. Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings. *Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. 74(1). P. 9-24. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2024-0002>. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – брав участь у розробленні технології виготовлення та виготовленні дослідних зразків циліндричних поршнів, розробленні експериментальних установок та експериментальних дослідженнях динаміки руху поршнів трійниками трубопроводів, опрацюванні та аналізі результатів експериментальних досліджень. Брав участь у підготовці статті до публікації.

3. Stetsiuk S., Doroshenko Y., **Bondarenko R.**, Filipchuk O., Volovetskyi V. Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation. *Scientific Journal of Silesian University of*

Technology. Series Transport. 2024. 123. P. 303-317. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.123.15>. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав аналіз сил, які діють на поршень під час його руху відводом трубопроводу та записав рівняння руху поршня. Сформував рекомендації щодо підбору матеріалу, довжини та швидкості руху циліндричного поршня із гіперпружного матеріалу, щоб він був здатний проходити крутовигнуті відводи трубопроводу без зупинки та застрягання. Брав участь у підготовці статті до публікації.

4. Volovetskyi V. B., Doroshenko Ya. V., Bugai A. O., Kogut G. M., Raiter P. M., Femiak Y. M., **Bondarenko R. V.** Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2022. 111(2). P. 64-77. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.9996>. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав CFD моделюванням газових потоків в трубопроводі в місці можливого утворення гідратів, які можуть бути перешкодою руху поршнів, встановив закономірності розподілу швидкості, тиску і об'ємної частки рідкої фази в цих місцях. Брав участь у підготовці статті до публікації.

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Запухляк В. Б., Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Розроблення технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж. *Нафтогазова енергетика.* 2024. 2(42). С. 71-84. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2\(42\)-71-84](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2024-2(42)-71-84). **Наукове фахове видання України.** Особистий внесок – запропонував ідею, брав участь у розробленні технології доставки трубопроводом ремонтної системи поршнем з осьовим отвором до локального дефекту стінки труби у важкодоступне місце, за крутовигнутий відвід або трійник, і встановленні там ремонтного бандажа. Брав участь у розробленні, виготовленні дослідних зразків ремонтних систем, розробленні та монтажі експериментальних установок для перевірки

працездатності розробленої технології та виконанні експериментальної апробації розробленої технології.

6. Дорошенко Я. В., Стецюк С. М., **Бондаренко Р. В.**, Данів З. В. Технології безтраншейної реновації трубопровідних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 2(87). С. 17-32. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-2\(87\)-17-32](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32). **Наукове фахове видання України**. Особистий внесок – описав технології виконання робіт з безтраншейної реновації трубопроводів методами SAPL та CIPP. Висвітлив принцип роботи спеціального обладнання, яке для цього використовується. Здійснив огляд матеріалів, які застосовуються у разі виконання робіт такими методами, вказав позитивні і негативні властивості кожного з них, сферу застосування. Брав участь у підготовці статті до публікації.

7. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу геометричної форми та матеріалу поршнів на ефективність очищення трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 4(89). С. 26-43. DOI: <https://doi.org/10.69628/pdogf/4.2023.26>. **Наукове фахове видання України**. Особистий внесок – брав участь у розробленні технології виготовлення дослідних зразків очисних поршнів, дослідженні прохідної здатності кожного зразка та підготовці статті до публікації.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Дорошенко Я., **Бондаренко Р.** Експериментальні дослідження динаміки протягування байпасним поршем ремонтних систем у важкодоступні дефектні місця трубопроводів. *Проблеми та перспективи транспортування та зберігання енергоносіїв*. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ – Яремче, 3-4 липня 2025 р.). Івано-Франківськ, 2025. С. 112-113. DOI: <https://doi.org/10.31471/pptzen2025>.

9. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Григорський С. Я., Маркевич М. В. Експериментальні дослідження динаміки протягування ремонтної системи байпасним поршем для виконання внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж. *Освіта і наука в Україні в період глобальних*

викликів сьогодення. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 28 листопада 2024 р.). Київ, 2024. С. 149-152. DOI: <https://doi.org/10.51587/9786-1773-89322-2024-16>.

10. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Іванов О. В., Маркевич М. В. Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту трубопровідних мереж для запобігання втрат енергоносіїв. *Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. Матеріали VIII Міжнародного конгресу (Львів, 16-18 жовтня 2024 р.). Львів, 2024. С. 165. DOI: <https://doi.org/10.51500/7826-43-8>.

11. **Бондаренко Р. В.**, Данів З. В. Технології внутрішньотрубного відновлення трубопроводів. *Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених (Чернігів, 21 квітня 2023 р.). Чернігів, 2023. С.14-15. URL: <https://stu.cn.ua/wp-content/uploads/2023/06/zbirnyk-gotovyj-13.06.pdf>

12. Shatskyi, M. Makoviicuk, **R. Bondarenko**, Y. Doroshenko On the estimates of the strength of a damaged pipeline restored by patching [VIII International conference. “In-service damage of materials, its diagnostics and prediction” “DMDP”], (Ternopil, 15-17 october 2025 y.). – Ternopil, 2025 – P. 1-4. URL: <https://dmdp.tntu.edu.ua/>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	24
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗТРАНШЕЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ У ВАЖКОДОСТУПНИХ МІСЦЯХ.....	33
1.1 Аналіз проблем технічного стану трубопроводних мереж у контексті впровадження безтраншейних методів їх відновлення.....	33
1.2 Аналіз технологічних рішень для безтраншейного відновлення трубопроводних мереж у важкодоступних місцях.....	39
1.3 Аналіз технологічних підходів до доставки ремонтних систем у важкодоступні місця трубопроводів.....	56
1.4 Постановка задач та конкретизація мети досліджень.....	62
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ ПОРШНЕМ РЕМОНТНОЇ СИСТЕМИ ДО МІСЦЯ ДЕФЕКТУ ТРУБОПРОВОДУ.....	64
2.1 Постановка задачі.....	64
2.2 Аналітична модель рухомої системи та розрахункова схема.....	67
2.3 Аналітичний розв’язок.....	69
2.3.1 Попередні зауваження.....	69
2.3.2 Етап протягування поршнем ремонтної системи сталевим трубопроводом до місця дефекту.....	70
2.3.3 Етап гальмування поршня безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби (до припинення подавання повітря компресором)ю.....	72
2.3.4 Етап припинення подавання повітря компресором (розвантаження).....	74
2.4 Аналіз результатів та рекомендації	76

2.4.1 Приклад розрахунку напружено-деформованого стану.....	76
2.4.2 Ключові впливи та практичні рекомендації.....	82
2.5 Чисельна модель процесу доставки поршнем ремонтної системи до важкодоступного місця дефекту трубопроводу.....	86
2.5.1 Математична модель.....	87
2.5.2 Геометричне 3D моделювання.....	89
2.5.3 Формування об'ємної розрахункової сітки та задання граничних умов.....	91
2.5.4 Результати чисельного моделювання.....	92
2.5.4.1 Поршень загальмував, одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу.....	92
2.5.4.2 Рух поршня крутовигнутим відводом трубопроводу....	96
2.6 Оцінювання міцності дефектного трубопроводу підсиленого внутрішньотрубно встановленим бандажем.....	100
2.7 Висновки до розділу 2.....	103
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ РЕМОНТНОЇ СИСТЕМИ ПОРШНЕМ У ВАЖКОДОСТУПНЕ МІСЦЕ ТРУБОПРОВОДУ.....	106
3.1 Розроблення технології виготовлення конструктивних елементів ремонтного пристосування.....	106
3.2 Розроблення та монтаж експериментальних установок.....	110
3.2.1 Експериментальні установки з крутовигнутим відводом.....	110
3.2.2 Експериментальні установки з трійником.....	116
3.3 Результати експериментальних досліджень.....	118
3.4 Висновки до розділу 3.....	126
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА І ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛОКАЛЬНОГО ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ.....	129

4.1 Розроблення технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж.....	129
4.2 Експериментальна апробація технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж.....	135
4.3 Промислова апробація технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж.....	146
4.4 Висновки до розділу 4.....	153
ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	172
ДОДАТОК Б ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ З ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДЕФЕКТНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ.....	176
ДОДАТОК В АКТ ТА ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ.....	201
ДОДАТОК Г АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	203

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CIPP – cured-in-place pipe;

CFD – computational fluid dynamics;

DN – умовний діаметр трубопроводу;

SAPL – spray-applied pipe lining;

ГРМ – газорозподільна мережа;

ТК – теплова камера;

ТП – тепловий пункт;

ЦТ – централізоване теплопостачання.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Тривалий термін експлуатації споруд трубопровідного транспорту без належної модернізації у поєднанні з інтенсивними корозійними процесами та деградацією матеріалу, є причиною масового накопичення дефектів, зниження міцності і все частішої втрати герметичності. Переважна частина трубопроводів газорозподільних і теплових мереж збудована у 1960–1970-х роках і давно відпрацювала свій проєктний ресурс. У багатьох випадках матеріали труб деградували через корозійні процеси, ерозійний знос, внутрішні відкладення і вплив доквілля. На сьогодні фізичне деградація трубопроводів газових і теплових мереж все більше досягає критичних масштабів, що зумовлює значне зростання кількості аварій та витоків енергоносіїв і порушень у роботі інженерних мереж, провалів ґрунту, заторів і пошкодження інфраструктури. Також деградація окремих ділянок трубопроводів газотранспортної системи є серйозною проблемою на шляху переходу до мультигазових мереж, здатних транспортувати не тільки природний газ, а і біометан, синтетичні гази та газо-водневі суміші. Таке перетворення надзвичайно важливе на сьогодні, оскільки, сприятиме диверсифікації енергетичного сектору, підвищенню його стійкості та створенню нових економічних можливостей. Перед переведенням газотранспортної системи на транспортування мультигазових сумішей необхідно виконувати моніторинг стану трубопроводів та масштабні ремонтно-відновлювальні роботи. Особливої уваги потребує підготовка до транспортування газо-водневих сумішей, адже водень при високому тиску здатен дифундувати в сталь, спричиняючи водневу крихкість і розвиток тріщин, особливо за наявності внутрішніх дефектів труби спричинених корозійними процесами.

Висока вартість, тривалість і складність виконання традиційних ремонтних робіт доволі часто робить їх неприйнятними, надзвичайно затратними, особливо у великих містах, де відновлення трубопроводів газорозподільних і теплових мереж пов'язане з перекриванням доріг, земляними роботами та руйнуванням

благоустрою. Доволі часто повна заміна трубопроводів газових і теплових мереж є економічно невиправданою, надзвичайно трудомісткою та технічно складною, особливо у щільній міській забудові та центрах міст. Значно ситуація ускладнюється на важкодоступних ділянках під транспортними магістралями, річками та спорудами, у зонах щільної забудови, історичної інфраструктури, центрах міст, де виконання відкритих робіт є технічно неможливим. Підтримання належного технічного стану лінійних споруд трубопровідного транспорту може забезпечити можливість їх подальшої експлуатації без виконання затратних робіт із повного демонтажу та заміни. Тому за останні десятиліття все більшої практичної значущості набули безтраншейні технології моніторингу та відновлення трубопроводів газових і теплових мереж, які не потребують виконання значних обсягів земляних робіт. Ці технології зменшують витрати, скорочують терміни робіт і забезпечують можливість відновлення важкодоступних ділянок трубопроводів без порушення міської інфраструктури та з мінімальним впливом на довкілля.

Розвиток безтраншейних технологій протягом останніх сорока років сприяв появі низки рішень для реновації протяжних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж, зокрема технологій внутрішнього нанесення полімерних покриттів SAPL [1, 2], однак такими покриттями не можливо підсилити трубопровід у місці локальних дефектів стінки спричинених корозійними процесами. Також поширеними є технології, які полягають у протягуванні поліетиленових труб [3, 4] або рукавів [5, 6], вивертанні рукавів [7, 8] у деградований трубопровід. Такі процеси реалізуються із застосуванням лебідок, гідравлічних установок, домкратів чи тракторів [9, 10], а в окремих дослідженнях за допомогою поршнів [11, 12].

Однак, такі безтраншейні технології застосовують для реновації протяжних ділянок газорозподільних та теплових мереж. Також поряд із своїми очевидними перевагами вони мають низку істотних обмежень. Вони потребують дороговартісного обладнання та матеріалів, значного обсягу підготовчих робіт, включно з розробленням робочих і приймальних котлованів, очищенням

внутрішньої поверхні труб і прокладанням тягових тросів. Крім того, такі методи практично неможливо реалізувати якщо трубопроводи містять відводи і трійники. У разі необхідності ремонту локальних дефектів спричинених корозійними процесами, деградацією трубопроводів ці технології є економічно недоцільними. Тому в останні роки значну увагу приділяють локальному безтраншейному ремонту газорозподільних і теплових мереж, який базується на внутрішньотрубному встановленні композитних бандажів (патчів) [1, 13]. Композитний бандаж внутрішньотрубно встановлюють безпосередньо у місці дефекту за допомогою надувних або механічних пристроїв (пакерів), які забезпечують щільне притискання та фіксацію бандажа до внутрішньої поверхні труби. При цьому механічні пристрої проштовхують жорсткими трубками до місця локального дефекту стінки труби. Такі технології є ефективним рішенням для локального ремонту стінки труби. Однак, вони мають обмеження щодо доставки механічного пристрою з ремонтним бандажем до дефекту стінки трубопроводу, особливо коли воно розташоване у важкодоступному місці, а саме за крутовигнутими відводами та трійниками чи іншими фасонними елементами трубопроводу. У таких випадках проштовхування жорсткими трубками механічних пристроїв є неможливе чи малоефективним через підвищений ризик заклинювання або пошкодження системи. Для виконання таких операцій технологій на сьогодні немає. Ураховуючи це, актуальною є розробка технології доставки композитних ремонтних бандажів у важкодоступне місце трубопроводу, куди традиційними методами неможливо їх доставити.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами.

Напрямок дисертаційного дослідження відповідає тематиці науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ), зокрема комплексній науково-дослідній роботі “Оптимізація проектування, спорудження та експлуатації трубопровідних систем для підвищення енергоефективності та надійності транспортування енергоносіїв” (держбюджетна науково-дослідна тема ІФНТУНГ 2023 – 2026 роки, номер державної реєстрації 0123U104540). Також дисертаційна робота безпосередньо

пов'язана з науково-технічною роботою “Розроблення технологій очищення внутрішньої порожнини та внутрішньотрубного ремонту складних трубопровідних систем” в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію за договорами, укладеними у 2023 році (науково-технічна робота за договором ДЗ/147-2023 від 26.10.2023 р., номер державної реєстрації 0123U104368).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних засад та технічних рішень для виконання внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж протягуванням ремонтних систем поршневыми засобами.

Завдання досліджень.

1. Аналітичні дослідження процесу доставки ремонтної системи поршнем до місця локального дефекту трубопроводу.

2. Дослідження особливостей газодинамічних процесів, які відбуваються під час доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом до локального дефекту, розташованого за крутовигнутим відводом.

3. Експериментальні дослідження процесу протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводами, які містить фасонні елементи (крутовигнутий відвід, трійник).

4. Розроблення, промислова апробація та впровадження технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж протягуванням ремонтних систем поршневыми засобами і встановленням їх в місці важкодоступного локального дефекту трубопроводу.

Об'єкт дослідження – технологічний процес ремонту трубопровідних мереж внутрішньотрубним встановленням ремонтних бандажів у важкодоступних місцях.

Предмет дослідження – технологічні та газодинамічні параметри доставки ремонтної системи у важкодоступне місце трубопроводу протягуванням її поршнем із осьовим отвором.

Методи дослідження. Аналітичні дослідження динаміки процесу протягування трубопроводом ремонтної системи поршнем із осьовим отвором

виконано методами математичного моделювання. Дослідження особливостей газодинамічних процесів, які відбуваються під час доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи до локального дефекту трубопроводу виконано методом скінчених об'ємів (CFD моделювання) із застосуванням газодинамічних моделей і рівнянь газової динаміки. Експериментальні дослідження виконувались з застосуванням методів планування експерименту. Основні висновки роботи узгоджуються з відповідними даними теоретичних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у виявленні якісно нових закономірностей впливу рушійної сили, сил опору та діаметра осьового отвору поршня на динаміку доставки ремонтної системи до місця локального дефекту трубопроводом зі змінною внутрішньою конфігурацією та визначається такими положеннями:

– вперше встановлено закономірності впливу:

а) рушійної сили, що виникає під час протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи сталевим трубопроводом на величину напружень, деформацій, видовжень конструктивних елементів, що дозволило оцінити їх міцність та встановити місцезнаходження ремонтного бандажа після гальмування поршня за місцем локального дефекту стінки труби;

б) діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску та рушійну силу, яка діє на нього, що дало змогу встановити оптимальні параметри конструкції поршня для забезпечення надійної доставки ремонтної системи у важкодоступне місце трубопроводу;

в) фізико-механічних властивостей матеріалу поршня з осьовим отвором із пружного матеріалу на його напружений стан, розподіл контактних сил і величину запоршневого тиску під час руху відводом трубопроводу, що дозволило встановити, за яких умов він не буде застрягати у таких елементах трубопроводів.

Практичне значення одержаних результатів. Виконані в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження дали змогу розробити техніку та технологію внутрішньотрубного ремонту газових і теплових мереж

протягуванням поршнем з осьовим отвором у важкодоступну ділянку сталевих трубопроводів ремонтної системи – “Тяговий поршень^Б”. Запропонована технологія забезпечує можливість швидкої доставки ремонтного бандажу у важкодоступне місце трубопроводу, розташоване за крутовигнутим відводом чи трійником і встановити його в місці локального дефекту стінки труби. Використання цього підходу дозволяє суттєво скоротити обсяги підготовчих операцій, спростити проведення робіт в ускладнених умовах, зменшити витрати на ремонт та час робочого процесу.

За результатами виконаних досліджень розроблено технологічну інструкцію з внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів. Розроблена технологія внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів мереж – “Тяговий поршень^Б” промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

- аналіз сучасних технологій безтраншейної реновації трубопроводів, висвітлено принципи роботи спеціалізованого обладнання, що використовується для їх реалізації, а також проведено огляд матеріалів, застосовуваних у таких технологіях, із визначенням їх переваг, недоліків та сфер доцільного використання [14, 15];

- аналітичне та CFD моделювання процесів руху поршня, протягування ним ремонтної системи прямолінійними ділянками та відводами трубопроводів, CFD моделювання газових потоків у трубопроводі в місці можливих перешкод, які можуть бути причиною зупинки руху поршня, оцінювання міцності дефектного трубопроводу підсиленого внутрішньотрубно встановленим бандажем [16-19];

- розроблення технології та виготовленні поршнів, розроблення та монтаж експериментальних установок, експериментальні дослідження руху поршня, протягування поршнем ремонтної системи трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід, трійник [16, 20-24];

– розробив технологію доставки трубопроводом ремонтної системи поршнем з осьовим отвором до локального дефекту стінки труби у важкодоступне місце, за крутовигнутий відвід або трійник, і встановленні там ремонтного бандажа [21, 25].

Постановка задач, аналіз і обговорення результатів досліджень проведено спільно з науковим керівником. Автор брав безпосередню участь у промисловій апробації та впровадженні розробленої технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення роботи викладено та обговорено на наукових конференціях різного рівня: Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи транспортування та зберігання енергоносіїв” (м. Івано-Франківськ – Яремче, 3-4 липня 2025 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції “Освіта і наука в Україні в період глобальних викликів сьогодення” (м. Київ, 28 листопада 2024 р.), VIII Міжнародному конгресі “Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування” (м. Львів, 16-18 жовтня 2024 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених “Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі” (Чернігів, 21 квітня 2023 р.), VIII International conference. “In-service damage of materials, its diagnostics and prediction” “DMDP”.

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідались на науковому семінарі кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв і розширеному фаховому науковому семінарі Інституту нафтогазової інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2025 році.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, з яких 4 – у міжнародних наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі даних Scopus, 3 – у наукових фахових виданнях, 5 – тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 203 сторінках машинописного тексту, з яких 128 – обсяг основного тексту дисертації.

Складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Робота ілюстрована 5 таблицями та 81 рисунком. Список використаних джерел містить 108 найменувань, з них 52 кирилицею та 56 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗТРАНШЕЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ У ВАЖКОДОСТУПНИХ МІСЦЯХ

Здійснено аналіз сучасного технічного стану газових і теплових мереж та окреслено основні проблеми, що ускладнюють їх відновлення традиційними методами. Виділено особливо проблемні ділянки з обмеженим доступом, у яких традиційні способи ремонту є технічно та економічно недоцільними. Розглянуто технологічні рішення безтраншейної реновації трубопроводів, які можуть бути застосовані в умовах обмеженого доступу, зокрема для відновлення відводів і трійників трубопроводів, та визначено їх переваги і недоліки. Особливу увагу приділено підходам до доставки ремонтних систем у важкодоступні місця трубопроводів. На основі аналізу сформульовано мету і завдання подальших досліджень.

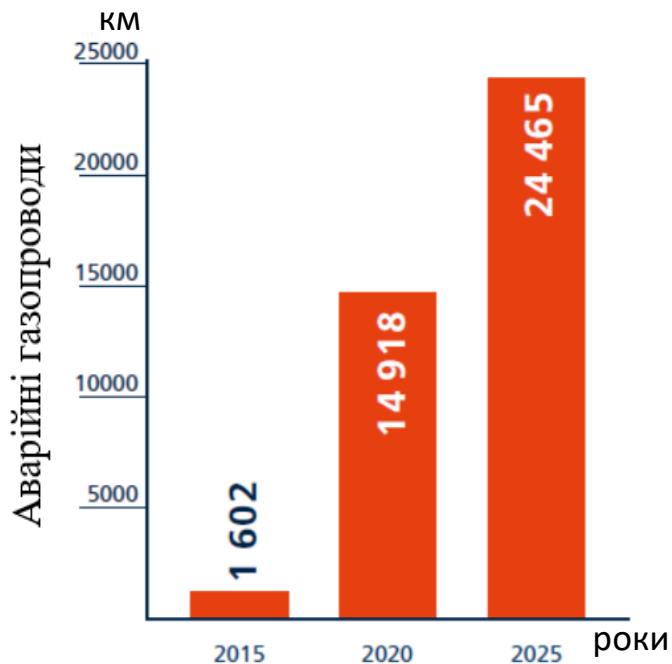
1.1 Аналіз проблем технічного стану трубопроводних мереж у контексті впровадження безтраншейних методів їх відновлення

Стан лінійних споруд трубопроводного транспорту, зокрема газорозподільних і теплових мереж в Україні сьогодні характеризується тривалим терміном експлуатації, значною зношеністю, деградацією, інтенсивними корозійними процесами та частими аваріями, обмеженими можливостями і ефективністю застосування традиційних методів моніторингу, ремонту, особливо в умовах урбанізованої забудови. Значна частина трубопроводів експлуатується понад 50 років, що призводить до накопичення дефектів, таких як корозія, витоки, тріщини, деформації та осідання ґрунту. За даними Поляруша К. А. [26], через корозійні процеси та деградацію великою проблемою є зношеність трубопроводних мереж різноманітного призначення, яка ще на 2019 рік досягала 60-90 %, що формує потребу в їх відновленні. При цьому особливу складність становлять

ділянки з обмеженим доступом для моніторингу і розкопування під дорогами, залізничними коліями, історичною забудовою або в промислових зонах.

Українська ГРМ розвивалася двома етапами. Перший етап тривав від 70-х до 80-х років минулого століття, коли почалася масова газифікація населених пунктів, навіть невеликих сіл. Другий етап це початок 90-х років. Якщо в 70-ті, 80-ті роки мережі будували у основному якісно, то в 90-х виходячи з наявних можливостей, ситуативно, без майстер-плану розвитку системи в цілому. На сьогодні газорозподільна мережа України це понад 350 тис. км труб, більшості яких мають тривалий термін експлуатації 40-50 років і вони сталеві, 20 % з них знаходяться в зношеному, деградованому стані. При цьому часто регіональні мережі це якісно і технічно різні сегменти. [27, 28]

Кількість аварійних газопроводів газорозподільних мереж в Україні з кожним роком збільшується. Якщо у 2015 році капітальних інвестицій потребували близько 1,5 тис. км мереж, то за п'ять років їх обсяг зріс у десять разів (рисуюнок 1.1). [29]



Рисуюнок 1.1 – Динаміка зміни технічного стану газових мереж України [29]

За даними голови асоціації газового ринку України Сенектутова Д. М. для утримування ГРМ від деградації реальні потреби в критично необхідних

інвестиціях складають 3,8 млрд грн на рік. У той же час середній обсяг інвестицій у газотранспортну систему в країнах Східної Європи складає 10,2 млрд грн (рисунок 1.2). [29]

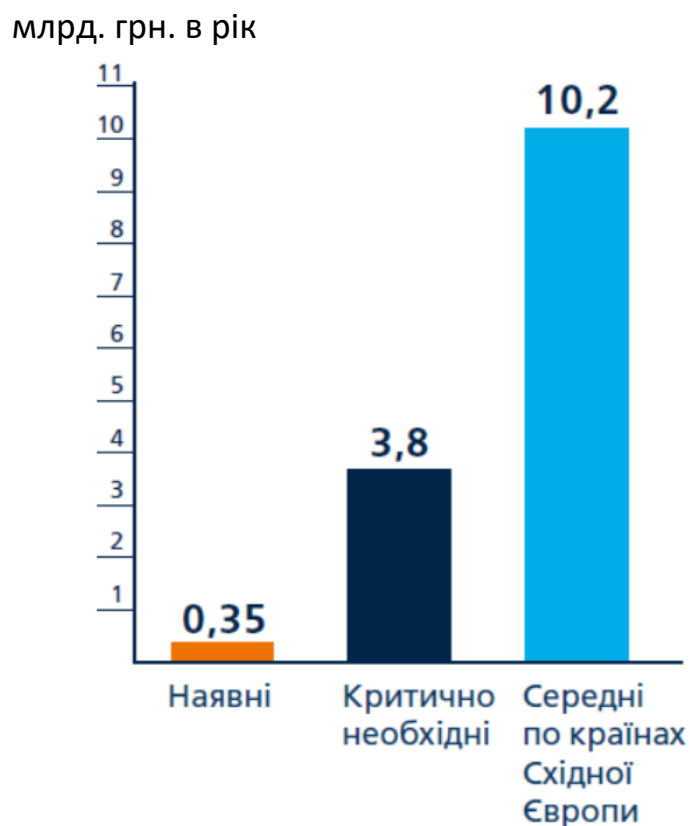


Рисунок 1.2 – Наявні та необхідні інвестиції для утримування ГРМ від деградації [29]

У нормативному документі «Правила технічної експлуатації систем газопостачання» [30] наводяться вимоги до приладового моніторингу технічного стану газорозподільних мереж та виявлення дефектів за результатами чого здійснюється щорічний аналіз корозійного стану сталевих підземних газопроводів. Так, для прикладу, в процесі підготовки до осінньо-зимового періоду фахівці АТ "Рівнегаз" провели комплексний приладовий моніторинг 9,3 тис. км газових мереж. У результаті виявлено та ліквідовано майже 340 витоків газу. Також треба було здійснити заміну 5,3 км газопроводів газотранспортної системи. [31]

Основні дефекти газові мереж в Україні є електрокорозійні, спричинені корозійними процесами (рисунок 1.3) [32], знос ізоляції, механічні пошкодження

(наприклад від зовнішніх впливів), тріщини, порушення герметичності та недостатній електрозахист.



Рисунок 1.3 – Фрагменти сталюї труби підземного газопроводу низького тиску з характерними ознаками електрокорозійного пошкодження вирізаний в місці аварійного витоку природного газу [32]

Не усі ці дефекти призводять до утворення витоків, значних руйнувань газопроводів, а тільки небезпечні, відношення яких до загального числа дефектів наведено в таблиці 1.1. Отже найпоширенішими небезпечними дефектами стінки труби газових мереж є корозія. Корозійні процеси можуть бути зосереджені як в локальних місцях, так і охоплювати протяжні ділянки газопроводів. Така корозія часто призводить до виникнення витоків газу на підземних газопроводах. [33]

Таблиця 1.1 – Статистика небезпечних дефектів [33]

Дефекти	Відсоток небезпечних дефектів, %
Корозія (втрати металу)	42,8-59,2
Розшарування	24,6-47,1
Розшарування з виходом на поверхню	1,5-2,6
Розшарування в навіколошовній зоні	6,2-7,7
Ризики	1,3-7,0

Що стосується теплових мереж, то у цілому в Україні їх протяжність у двотрубному обчисленні становить 31314,1 км (за рахунок схем оптимізації централізованого опалення та децентралізації протяжність теплових мереж зменшилася на 1114,7 км (у двотрубному обчисленні) або на 3 %), з них зношених та аварійних – 5952,6 км (19 %). [34]

У Києві загальна протяжність теплових мереж складає близько 2,5 тис. км у двотрубному вимірі. Рівень зношеності, деградації при цьому складає біля 60 %. Тому щорічно ПАТ «Київенерго» у міжопалювальний період проводить комплекс робіт з моніторингу, реконструкції (повної заміни ділянок) та ремонтів теплових мереж. Так, для прикладу, у 2014 р. повністю замінено на нові попередньо ізольовані металеві та пластикові труби більш ніж 70 км труб тепломереж [35].

За даними КП «Київтеплоенерго», більше ніж 300 працівників на чергуванні усувають в середньому 40 пошкоджень щодоби (локалізують витoki теплоносія, ремонтують пошкоджені ділянки, реагують на позаштатні ситуації внаслідок ракетних обстрілів та усунення їх наслідків тощо). Тільки за перші півтора місяці 2023 року аварійно-ремонтні бригади усунули понад 1,3 тис. пошкоджень теплових мереж опалення та гарячого водопостачання. При цьому терміни відновлення послуг із теплопостачання в середньому тривав не довше доби. [36]

Голова Співки споживачів комунальних послуг Олег Попенко повідомив, що через жакхливий стан теплових мереж втрати тепла досягають 40-50 %. Близько 600-700 кілометрів мереж м. Києва потребують термінового капітального ремонту. При цьому проблема ускладнюється відсутністю точних даних про стан мереж. [37]

Частина трубопроводів теплових мереж в Києві (порядку 47 км) знаходиться на значній глибині у зоні періодичного затоплення ґрунтовими водами, що призводить до підвищення втрат теплової енергії через ізоляцію та інтенсивної корозії трубопроводів. 20,3 км теплових мереж проходять у важкодоступних місцях під будівлями. [38]

Щоб виконати моніторинг, замінити усі зношені теплові мережі м. Київ необхідні значні фінансові ресурси та тривалий період часу. Тому на сьогодні виявляють найаварійніші ділянки, небезпечні дефекти та враховують це при

плануванні програми ремонту теплових мереж [39]. За даними фахівців КП «Київтеплоенерго» найбільше дефектів виявлять під час випробування трубопроводів теплових мереж на міцність. Так, під час гідравлічного випробування тепломереж в Києві у 2025 р. виявили та ліквідували 1,8 тисячі пошкоджень трубопроводів, зокрема 225 – на магістральних трубопроводах. [40] При цьому щодоби аварійні бригади КП «Київтеплоенерго» ліквідовують 30-40 пошкоджень мереж. За період опалювального сезону 2024 року підприємство усунуло понад 6 тисяч пошкоджень теплових мереж. [41]

Не кращий стан теплових мереж м. Харкова. Так за даними КП «Харківські теплові мережі» на його балансі та в обслуговуванні знаходяться теплові мережі загальною протяжністю 1638 км у дво- трубному обчисленні, у тому числі 383 км магістральних трубопроводів, 974 км розподільних мереж та 281 км мереж гарячого водопостачання. При цьому зношеність, деградація трубопроводів теплових мереж складає близько 75 %, а з урахуванням стану інженерних комунікацій і теплоізоляції підприємство вважає, що 96 % теплових мереж повністю вичерпали свій ресурс. Одним з наслідків незадовільного стану мереж теплопостачання є зростаюча величина витoku теплоносія. Так середній витік теплоносія в опалювальний сезон 2016/2017 р. складав 1350 м³/год, а в опалювальний сезон 2019/2020 р. – 1770 м³/год. Така динаміка витоків теплоносія пояснюються зростанням кількості ушкоджень тепломереж. [42, 43]

Основними причинами дефектів трубопроводів теплових мереж є:

- корозійні процеси під теплоізоляцією, які у сталевих трубах виникають при зволоженні утеплювача внаслідок проникнення вологи/солей. Це спричиняє втрату металу ззовні та погіршення теплоізоляційних властивостей;
- погіршення якості мережевої води (кисень, рН, солевміст, мікробіологія), що пришвидшує внутрішні корозійні процеси, накипо- та шламонакопичення;
- деградація матеріалів і теплоізоляції, зволоження теплоізоляції прискорює корозію сталевих труб.

Таким чином, газорозподільні та теплові мережі України наразі відзначаються двома головними характеристиками. Мають тривалий термін

експлуатації і високий рівень пошкоджень (через зношеність, деградацію, корозійні процеси, військові дії тощо) та суттєві потреби в моніторингу, модернізації, реновації, реконструкції та ремонті. Особливо проблемними є ділянки трубопровідного транспорту з обмеженим доступом під автодорогами, залізницями, історичною забудовою, будівлями або у промислових зонах. Також проблемними з точки зору доступу є підземні безканальні теплотраси у центральних частинах міст, прокладені в 1960–1980-х роках, ділянки трубопроводів, що проходять під площами, скверами, теплові камери та вузли, до яких утруднений підхід через щільну забудову.

У важкодоступних місцях газотранспортної системи, теплових мереж моніторинг, відновлювальні, ремонтні роботи ускладнені і дефекти накопичуються. З огляду на це нагальною потребою для підвищення надійності мереж є застосування сучасних безтраншейних методів моніторингу, відновлення та ремонту трубопроводів. Ці методи дозволяють мінімізувати обсяг земляних робіт, скоротити час простою мереж та знизити вплив на інфраструктуру і довкілля, знизити ризики для суміжних інженерних систем. Вони є надзвичайно ефективними для внутрішнього відновлення працездатності без повної заміни мереж. Однак вибір технології безтраншейного відновлення безпосередньо залежить від результатів моніторингу і точного розуміння технічного стану трубопроводу і можливостей технології.

1.2 Аналіз технологічних рішень для безтраншейного відновлення трубопровідних мереж у важкодоступних місцях

Безтраншейні технології це набір методів, матеріалів і обладнання для спорудження, моніторингу, 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. [44]

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 треба робити його моніторинг, у разі потреби, очистити внутрішню стінку дефектної ділянки трубопроводу. Якісне очищення забезпечує необхідну адгезію матеріалів, якими буде виконано відновлення трубопроводу.

Внутрішню стінку трубопроводів найчастіше очищують струменевими методами (гідроструменивий, гідроабразивний, піскоструменевий). Для цього застосовують різні спеціальні пристрої, які складаються з струменевих апаратів і підтримуючого пристосування (рисунок 1.4). 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.



Рисунок 1.4 – Пристрої для струменевого внутрішньотрубного очищення трубопроводів [45]

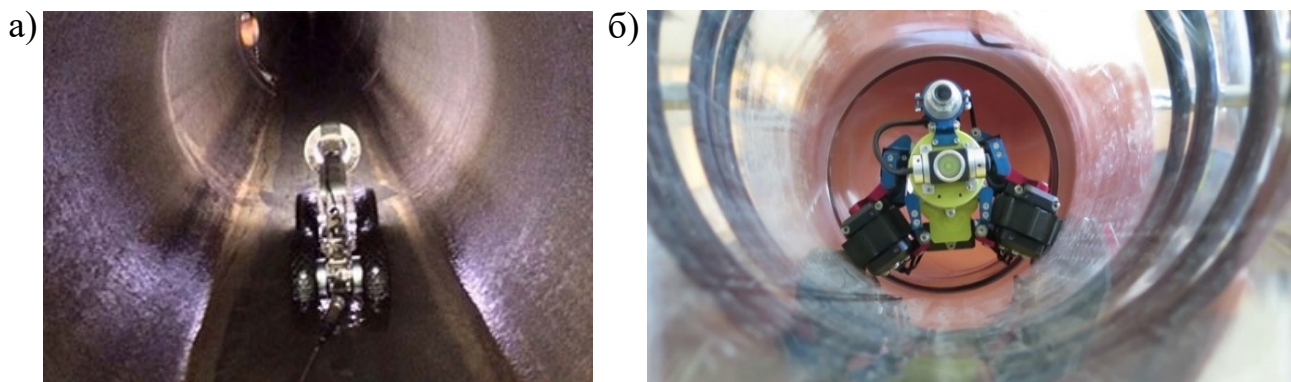
Також все більшого поширення набуває роботизована абразивоструменева очистка внутрішньої стінки дефектних ділянок трубопроводу перевагами якої є точний контроль, велика продуктивність, менша витрата абразиву, постійна програмована швидкість руху, як вперед, так і назад, і відеоконтроль встановленими в передній і задній частині відеокамерами (рисунок 1.5).

Після очищення внутрішньої стінки трубопроводу треба виконати моніторинг, внутрішньотрубне обстеження, яке в основному полягає 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.



Рисунок 1.5 – Роботизоване абразивоструменеве очищення внутрішньої стінки трубопроводу [46]

Відеокамери, освітлювані пристрої та інше обладнання для обстеження трубопроводів розміщують на самохідних діагностувальних роботах, які ще називають кроулерами. Кроулери можуть мати колісний (рисунок 1.6, а) або гусеничний (рисунок 1.6, б) рушій і переміщуються трубопроводом в автономному режимі (живлення від акумулятора) або живляться з допомогою кабелю. Кроулери з гусеничним рушієм є маневреними і їх доцільно застосовувати у місцях, де ділянки трубопроводу мають значний нахил, є відводи з малим радіусом вигину, трійники в яких треба змінити напрям руху кроулера.



а) – колісний рушій; б) – гусеничний рушій

Рисунок 1.6 – Кроулер [47]

Результати внутрішньотрубного моніторингу, обстеження дають змогу визначити проблеми трубопровідної системи та врахувавши усі інші обставини на основі чого підібрати найефективніше, економічне рішення, встановити які безтраншейні технології можуть бути застосовані.

Методи безтраншейної реновації трубопроводів можна розділити 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. [14, 15]

SAPL методи застосовують коли потрібно виконати відновлення протяжних частково зношених ділянок трубопроводів або локальний ремонт у місці інтенсивних корозійних процесів. 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,

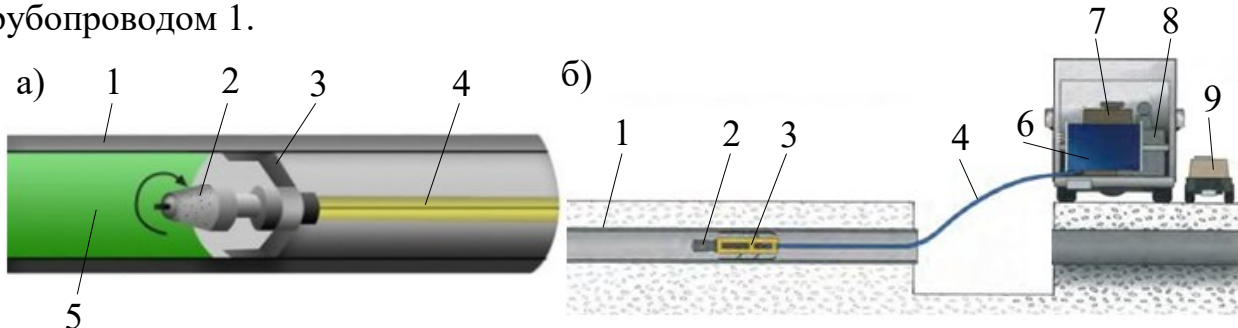
епоксидну смолу, поліестер, силікон і поліуретан. Також застосовують суміш епоксидної смоли і поліуретану, яка добре захищає стінку від корозії. [1, 48]

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

Ручне внутрішньотрубне розпилення захисного покриття виконують для відновлення непряжних ділянок трубопроводів великого діаметра.

Для внутрішньотрубного машинного розпилення застосовують різні спеціальні пристрої, які складаються з форсунки 2, що обертається, і підтримуючого пристосування 3 (рисунк 1.7, 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 складротом) шланг 4. Тоді до нього під'єднати пристрій для розпилення захисного покриття і лебідкою 6 (рисунк 1.7, б) або вручну протягувати його трубопроводом 1.



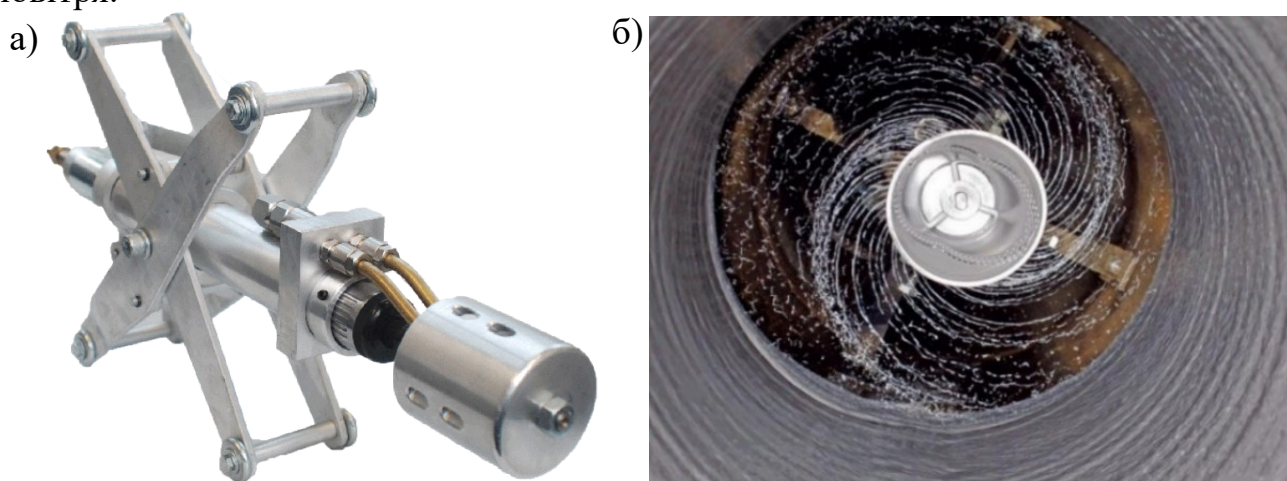
а) – внутрішньотрубне нанесення захисного покриття; б) – протягування пристрою трубопроводом;

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 1.7 – Схема машинного внутрішньотрубного нанесення захисного покриття [13, 49]

Захисне покриття на внутрішню стінку трубопроводів наноситься безповітряним розпиленням. Технологія безповітряного розпилення ґрунтується на опорі навколишнього повітря струменю рідкого ізоляційного матеріалу, який витікає з великою швидкістю (тиск до 25 МПа) з форсунки. [50] 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 (рисунок 1.7, б).

Форсунки мають пневматичний привід. Тому до пристрою крім шлангу для подавання покриття треба під'єднувати шланг для подавання повітря (рисунок 1.8, а) від компресора. Покриття розпилюється форсункою (рисунок 1.8, б), яка обертається потоком повітря. Швидкість обертання форсунки регулюють витратою повітря.

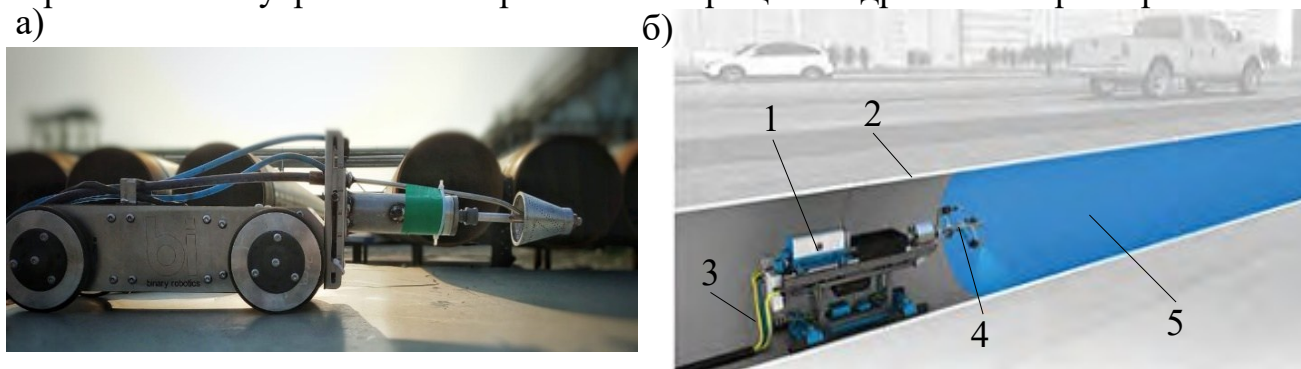


а) – пристрій безповітряного розпилення; б) – безповітряне розпилення захисного покриття

Рисунок 1.8 – Машинне внутрішньотрубне нанесення захисного покриття [2, 51]

Внутрішньотрубне роботизоване розпилення виконують самохідними дистанційно керованими роботами, які переміщуються трубопроводом за допомогою колісного (рисунок 1.9, а) або гусеничного рушія. Так само як і у разі машинного внутрішньотрубного нанесення у форсунки 4 робота 1 шлангами 3 подають покриття і повітря (рисунок 1.9, 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 нанесене 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.



а) – внутрішньотрубний робот; б) – схема безповітряного розпилення роботом захисного покриття

1 – внутрішньотрубний робот; 2 – відновлюваний трубопровід; 3 – шланг;

4 – форсунка; 5 – внутрішньотрубне покриття

Рисунок 1.9 – Роботизоване внутрішньотрубне нанесення покриття [13, 52]

Для магістральних газопроводів SAPL методи застосовують в основному щоб зменшити шорсткість внутрішньої поверхні, що в свою чергу дає змогу зменшити перепад тиску між компресорними станціями і тоді потрібна менша витрата палива. [1]

Недоліками SAPL методів є те, що захисне покриття є тонке і його нанесення не призводить до збільшення міцності трубопроводу. Із тієї ж причини його не можна застосовувати для запобігання витіканню транспортованого середовища з трубопроводу у разі виявлення наскрізних дефектів. Також такі методи у основному застосовують для протяжних деградованих ділянок трубопроводів. [14]

Структурні методи полягають у встановленні у внутрішню порожнину деградованих ділянок трубопроводів різноманітних лайнерів (вкладишів), 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;
- “Прімус 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 [53] засвідчили, що вісімдесят чотири відсотки опитаних комунальних підприємств у Сполучених Штатах регулярно використовують CIPP метод для відновлення стану своїх лінійних споруд трубопровідного транспорту, які мають тривалий термін експлуатації. 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 деградованих ділянок трубопроводів, які потребують дорогої заміни, і суттєво продовжити термін їх експлуатації [14, 15, 53]. Інші також поширені структурні методи, їх переваги і недоліки описано в [11, 54, 55].

CIPP метод застосовується як для повністю, так і для частково зношених, деградованих водопроводів, теплопроводів, каналізації [5, 7], які мають тривалий термін експлуатації, для частково зношених газових мереж середнього та низького тиску та трубопроводів якими транспортують різні хімічні речовини діаметром від 100 мм до 3000 мм та довжиною понад 900 м [8].

Особливістю CIPP методу є поміщення спеціального безшовного тонкого рукава у внутрішню порожнину відновлюваної ділянки, елементу (відвід, трійник)

трубопроводу і затвердіння його для створення нової структурної труби у деградованій. Щоб рукав затвердів його до встановлення в відновлюваний трубопровід просочують спеціальною смолою. [2, 7]

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 [1] 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 [7].

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) [56]. FRP це композиційний матеріал, виготовлений з полімерної матриці, армованої скляними, вуглецевими, базальтовими або арамідними волокнами. [57]

Епоксидно-поліефірна структура рукава забезпечує значний опір зовнішнім навантаженням, а епоксидно-скловолоконна – велику міцність на розрив. [58]

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 термореактивних смол – поліефірні, вінілові ефіри і епоксидні смоли. У кожній із цих трьох груп існують сотні комбінацій із специфічними характеристиками, які відрізняють їх ефективність. [5] Усі смоли мають різні короточасні властивості при згинанні та розтягуванні. Епоксидна смола зазвичай застосовується у разі 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. [59]

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

Рукави у відновлювані ділянки трубопроводів поміщають різними способами – гідростатичною інверсією, пневматичною інверсією та протягуванням і надуванням повітрям або водою [2, 48, 60].

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 (рисунок 1.10). 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 [5].

Якщо відновлюють трубопроводи великих діаметрів то просочування смолою в основному 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. [5] У разі відновлення трубопроводів малого діаметра процес просочування рукава смолою у основному виконують на монтажному майданчику.

Пневматична інверсія полягає у вивертанні рукава внутрішньою стороною на зовні, як панчошу, тиском повітря, яке подають від компресора. Таким чином рукав проштовхують у відновлювану ділянку трубопроводу. Після вивертання сторона рукава просякнута смолою пристає до внутрішньої стінки трубопроводу і відбувається перетворення рукава на тверду, структурно міцну трубу. [54] Якщо

пневматичною інверсією прокладають рукави великого діаметра то після зав'язування і змотування одного кінця інший затискають в фланці установленій на автомашині установки (рисунок 1.10, а) або міцно прикріплюють до верхнього чи нижнього кільця інверсійної (направляючої) труби (рисунок 1.10, б) і тиском повітря вивертають рукав.

а)



б)



а) – із кріпленням у фланці [54]; б) – із застосуванням інверсійної труби [61]

Рисунок 1.10 – Поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу пневматичною інверсією

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 його хомутом до носової частини інверсійного барабана (рисунок 1.11, а). Тиском повітря вивертають рукав і поміщують його у відновлюваний трубопровід (рисунок 1.11, б).

Гідростатична інверсія виконується заповненням інверсійної труби водою. Гідростатичний напір води безперервно штовхає рукав позовжньо у відновлюваний трубопровід і вивертає його навиворіт, щільно притискаючи при цьому просочену смолою сторону до внутрішньої стінки (рисунок 1.12). [62]

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 проштовхують жорсткий дріт яким затягують тяговий трос. Тяговий

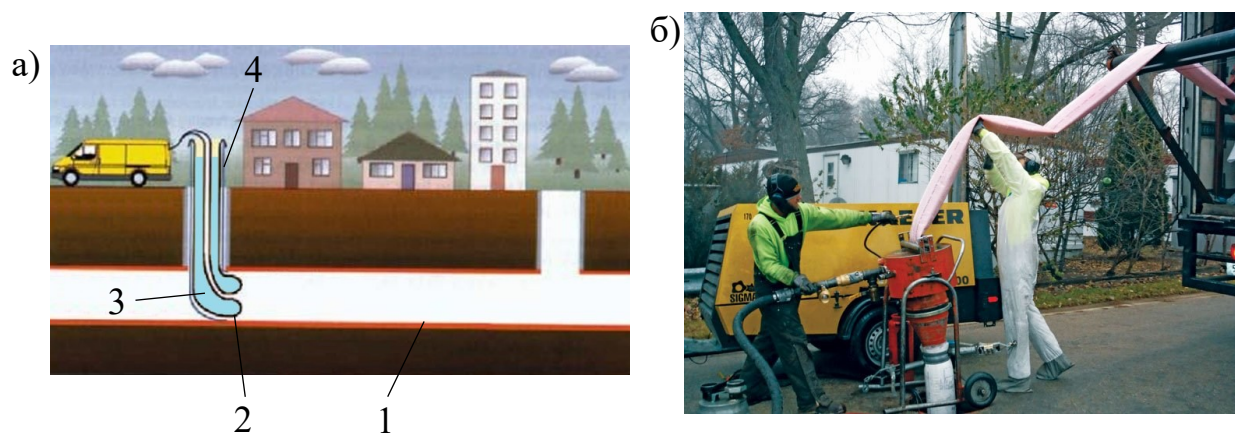
трос кріплять до рукава і тяговим засобом протягують через відновлювану ділянку трубопроводу. Протягнутий рукав заглушують з двох сторін і надувають повітрям або водою в результаті чого відбувається притискання його є до внутрішньої стінки трубопроводу. Такий спосіб є доцільним у багатьох випадках, для прикладу якщо відновлювана ділянка трубопроводу містить труби різного діаметра. [14]



а) – закріплення рукава до носової частини інверсійного барабана [63];

б) – вивертання рукава тиском повітря [64]

Рисунок 1.11 – Пневматична інверсія рукава малого діаметра



а) – схема виконання робіт [65]; б) – технологічний процес [66]

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

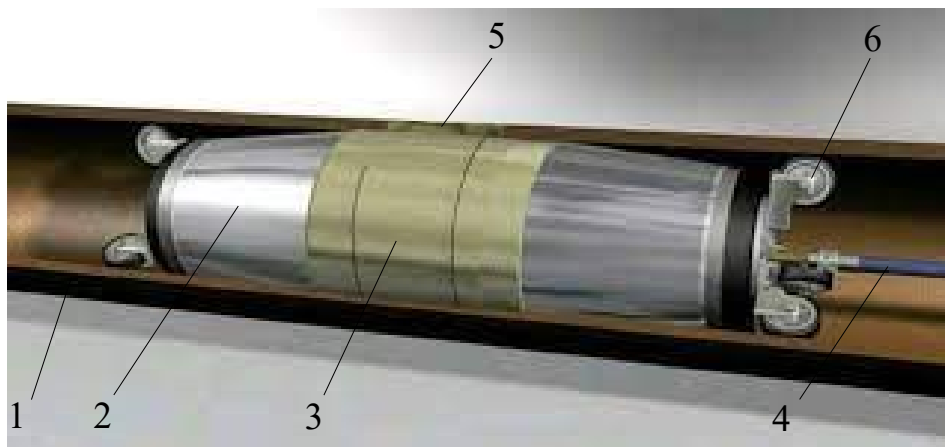
Рисунок 1.12 – Поміщення рукава у відновлювану ділянку трубопроводу гідравлічною інверсією

Якщо необхідно виконати місцевий ремонт і відновити непротяжну деградовану 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 ремонтного 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 проштовхують до місця встановлення рукава. Тоді нагнітають пару, гарячу воду або повітря всередину еластичної оболонки пакера до необхідного тиску. У результаті надування відбувається розширення еластичної оболонки і щільне притискання рукава до внутрішньої стінки відновлюваної ділянки трубопроводу (рисунок 1.13). Після затвердіння смоли стравлюють повітря або випускають воду із еластичної оболонки і пакер виймають з трубопроводу. [55]

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 пакери виготовляють криволінійної форми (рисунок 1.14).



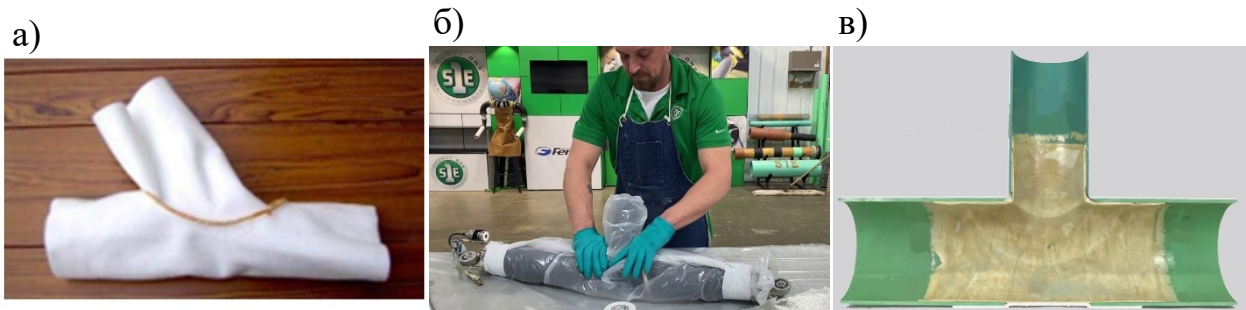
1 – відновлюваний трубопровід; 2 – гумова оболонка; 3 – рукав; 4 – жорстка трубка; 5 – наскрізний дефект; 6 – ролик

Рисунок 1.13 – Встановлення рукава пакером [67]



Рисунок 1.14 – Пакер для відводів трубопроводів [68]

Для трійників виготовляють Т-подібні рукави (рисунок 1.15, а), які просочують смолою. Пакери для таких рукавів містять надувні еластичні оболонки-відгалуження (рисунок 1.15, б). Т-подібний рукав поміщають на пакер, який протягують або проштовхують до місця ремонтowanego 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 і відбувається затвердіння смоли (рисунок 1.15, в). Таким чином відбувається механічне та клейове з'єднання. Після затвердіння випускають повітря з пакера і видаляють його з трубопроводу. [68]



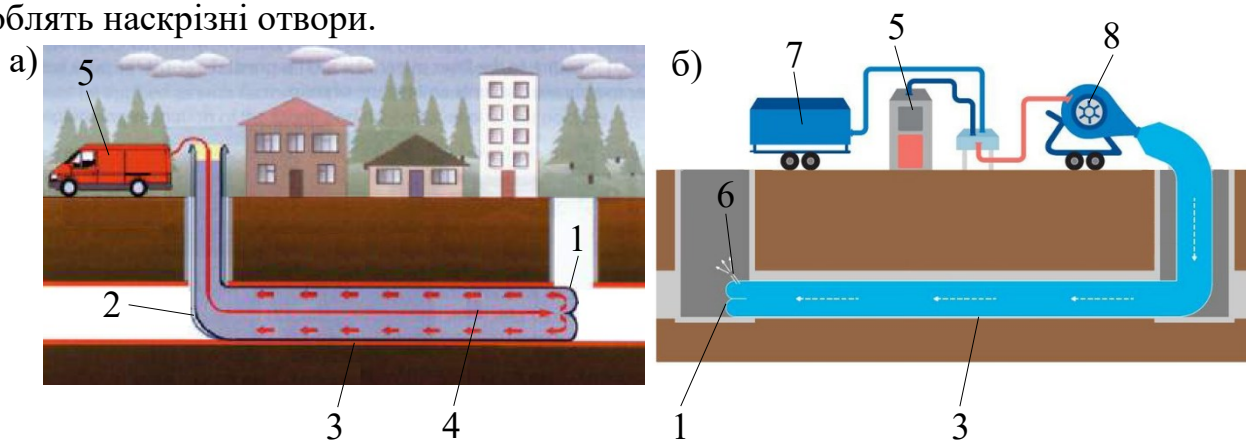
а) – Т-подібний рукав [69]; б) – пакер для трійників [70]; в) – затверділий Т-подібний рукав [71]

Рисунок 1.15 – Ремонт трійників CIPP методом

Наступним етапом після поміщення рукава у деградовану ділянку трубопроводу є його затвердіння і створення нової структурної труби у дефектній. Смола якою просякнутий рукав може тверднути при температурі довкілля або в результаті нагрівання парою, гарячим повітрям чи гарячою водою. Також для затвердіння 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 довкілля час затвердіння смоли складає від 2 до 12 годин, тоді як в результаті нагрівання парою, гарячим повітрям або гарячою водою рукави можуть затвердіти всього за 30 хвилин [70].

Для затвердіння рукава після завершення гідростатичної інверсії влаштовують циркуляцію води через бойлер (рисунок 1.16, 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.



а) – циркуляція води [68]; б) – пакер для трійників [2];

1 – рукав; 2 – інверсійна труба; 3 – відновлювана ділянка трубопроводу; 4 – шланг подавання гарячої води;

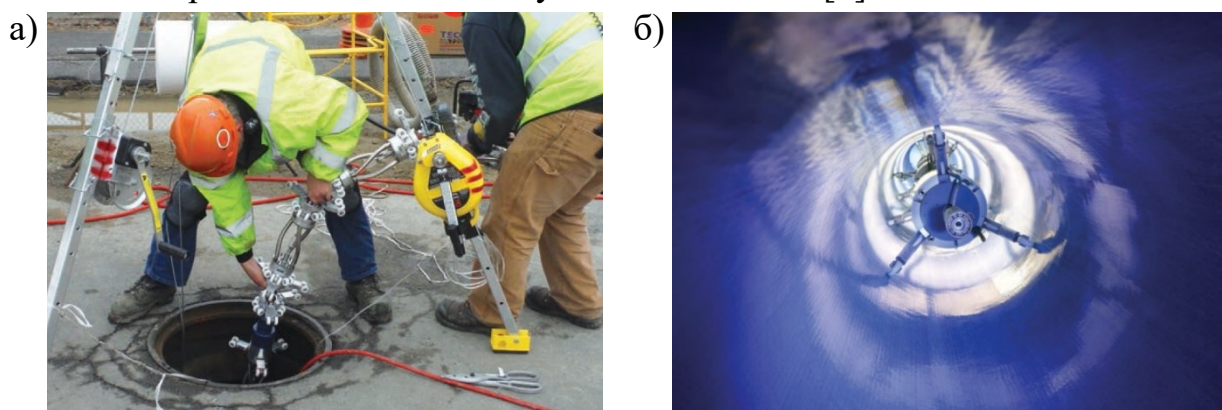
5 – бойлер; 6 – вихід повітря і пари; 7 – компресор; 8 – інверсійний барабан

Рисунок 1.16 – Схеми подавання теплоносія для затвердіння рукава

Гаряча вода призводить до твердіння термореактивної смоли. Температуру в різних точках на поверхні рукава контролюють термopарами. Коли відбулось твердіння рукава воду поступово охолоджують і видаляють. Тоді відрізають і видаляють інверсійну трубу. [68, 72]

Також для затвердіння рукава після його поміщення в відновлювану ділянку трубопроводу можуть парогенератором та компресором нагнати пару і повітря (рисунок 1.16, б). При цьому, як правило, потік пари і повітря нагнітають з одного кінця рукава, тоді він протікає усією довжиною рукава і виходить із протилежного його кінця через спеціальний колектор, де контролюють температуру та внутрішній тиск [5].

Технологія затвердіння рукавів ультрафіолетовим світлом 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 (рисунок 1.17). У результаті дії ультрафіолетового світла затвердіння відбувається протягом кількох хвилин. Для такого методу рукав повинен бути просякнутий спеціальними смолами і повинні бути фоточутливі ініціатори. Такі рукави можна зберігати та транспортувати без охолодження і вони залишаються придатними для застосування місяцями. [5]



а) – поміщення пристроями у трубопровід [73]; б) – рух пристрою трубопроводом [74]

Рисунок 1.17 – Затвердіння рукава ультрафіолетовим світлом

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. [1]

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 трубопроводу тиском і відеоконтроль, який можна виконати кроулером.

Перевагами CIPP методу є те, що відновлений трубопровід є структурно армований новим внутрішнім шаром, який здатний витримувати значні, як внутрішні, так і зовнішні навантаження, забезпечити міцність сильно пошкоджених, дефектних ділянок трубопроводів, усунути витoki та їх запобігти, суттєво продовжити термін експлуатації трубопроводу, покращити 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 [69].

Ефективне застосування CIPP методу значно ускладнюється у випадках, коли дефектна ділянка розташована у важкодоступному місці. Основною проблемою є геометрична складність траси, зокрема наявність фасонних елементів (крутовигнутих відводів та трійників), які суттєво ускладнюють протягування або інверсію рукава. У таких умовах виникають ризики скручування, защемлення або перекриття просвітів, що може призвести до нерівномірного укладання рукава, дефектів формування, зморшок або неповного з'єднання з поверхнею труби.

1.3 Аналіз технологічних підходів до доставки ремонтних систем у важкодоступні місця трубопроводів

Протягування у деградовані, дефектні ділянки трубопроводів поліетиленових труб [3, 4] або рукавів [5, 6] виконується лебідками, гідравлічними статичними установками, домкратами та іншою колісною технікою [9, 10]. Це зумовлює об'єктивні складності пов'язані з потребою розроблення достатніх розмірів приймального котловану для розміщення в ньому тягових засобів або поворотних блоків. Також потрібно прокладати в зношений сталевий трубопровід тяговий трос, очищувати внутрішню порожнину зношеного сталевого трубопроводу протягуванням ним очисного поршня.

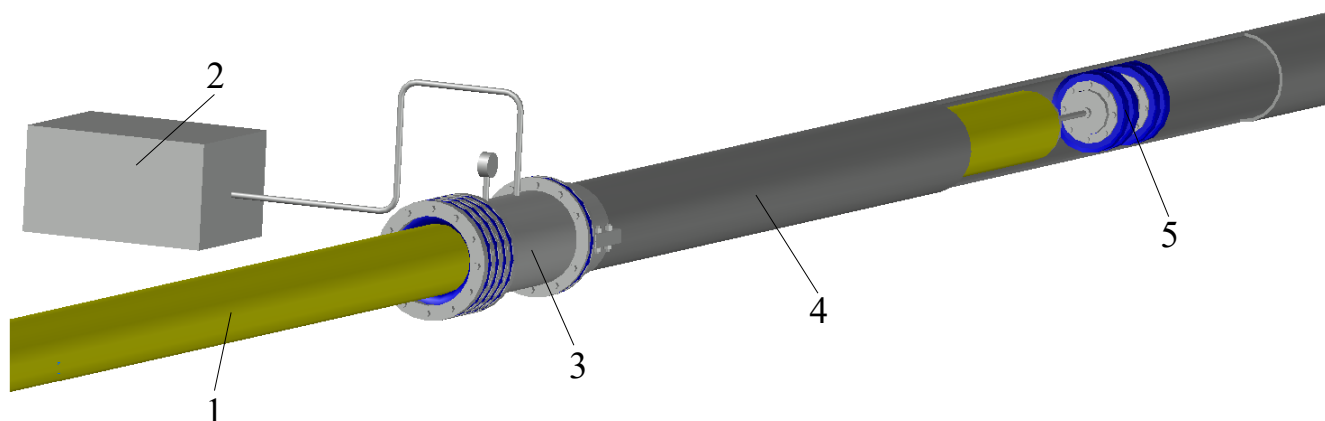
Протягування поліетиленових труб [3, 4] або рукавів [5, 6] у зношені ділянки сталевих трубопроводів традиційно здійснюється із застосуванням лебідок, гідравлічних статичних установок, домкратів чи іншої спеціальної колісної техніки. Такий підхід, попри його поширеність, супроводжується низкою технологічних та організаційних обмежень. Передусім це стосується необхідності облаштування приймальних котлованів значних розмірів, у яких розміщуються тягові механізми, напрямні ролики або поворотні блоки. Це не тільки ускладнює

виконання робіт у щільній забудові чи важкодоступних місцях, але й підвищує загальну вартість та тривалість відновлення.

Крім того, перед початком протягування в трубопровід слід попередньо прокласти тяговий трос. Також потрібно здійснити очищення внутрішньої порожнини зношеного сталевго трубопроводу. У результаті процес стає складним у реалізації, особливо на протяжних або важкодоступних ділянках, розташованих за крутовигнутими відводами чи трійниками.

Також для реалізації таких технологій потрібно використовувати важку техніку, транспортувати її до місця ремонту та організовувати під'їзні шляхи, що особливо проблематично у важкодоступних місцях (під мостами, річками, на схилах, у заболочених зонах, тунелях або підземних переходах).

У результаті для локального ремонту дефектів стінки труби у важкодоступних місцях такі способи доставки, тягові засоби стають малоефективними. Щоб уникнути цих ускладнень у [11, 75] протягування поліетиленової труби 1 в зношений сталевий трубопровід 4 запропоновано здійснювати поршнем 5 (рисунок 1.18). Поршень 5 рухається під тиском повітря, яке подається компресором 2 в міжтрубний і запоршневий простір. Щоб в запоршневому просторі підтримувався необхідний тиск треба герметизувати простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим. Для цього розроблено ущільнювальну систему 3.



1 – протягуваний поліетиленовий трубопровід; 2 – компресор; 3 – ущільнювальна система; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – поршень

Рисунок 1.18 – Протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий поршнем [11, 75]

Важливим для виконання таких робіт є підбір компресора. Для цього в [11, 75] динаміку процесу протягування поршнем поліетиленової труби розглянули в комплексі. На першому етапі визначили сили, які діють на рухому систему (рисунок 1.19) і описали другим законом Ньютона рух поршня з прикріпленням до нього поліетиленовим трубопроводом

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{\text{в.с}}^2}{4} - F_{\text{Тм.н}} - F_{\text{Тн.мп}} - F_{\text{Ту.с}}, \quad (1.1)$$

де $\sum_{i=1}^n F_n$ – сума сил, які діють на рухому систему; P_{Π} – тиск повітря в запоршневому просторі; $D_{\text{в.с}}$ – внутрішній діаметр сталевго трубопроводу; $F_{\text{Тм.н}}$ – сила механічного тертя між манжетами поршня та стінкою сталевго трубопроводу; $F_{\text{Тн.мп}}$ – сила тертя між поліетиленовою трубою та сталевгою; $F_{\text{Ту.с}}$ – сила тертя між поліетиленовою трубою та кільцевими манжетами ущільнювальної системи.

Після аналітичного опису всіх силових взаємодій визначено необхідний тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленням до нього поліетиленовим трубопроводом рухався горизонтальним трубопроводом

$$P_{\Pi} = \frac{4 \left(n_{\text{м.н}} f_{\text{м.н}} E h_{\text{м}} D_{\text{в.с}} \frac{D_{\text{м.н}} - D_{\text{в.с}}}{D_{\text{м.н}}} + f_{\text{н.мп}} q_{\text{н.мп}} L_{\text{н.мп}} + n_{\text{м.у.с}} \pi D_{\text{з.н}} B P_{\text{к}} f_{\text{у.с}} \right)}{\pi D_{\text{в.с}}^2}, \quad (1.2)$$

де $n_{\text{м.н}}$ – кількість манжет поршня; $f_{\text{м.н}}$ – коефіцієнт тертя ковзання між гумовими манжетами поршня та стінкою сталевго трубопроводу; E – модуль пружності гуми; $h_{\text{м}}$ – товщина манжети поршня; $D_{\text{м.н}}$ – діаметр манжет поршня до його запасування в трубопроводі; $f_{\text{н.мп}}$ – коефіцієнт тертя ковзання між поліетиленом та сталлю; $q_{\text{н.мп}}$ – рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу; $L_{\text{н.мп}}$ – довжина поліетиленової труби; $n_{\text{м.у.с}}$ – кількість манжет в ущільнювальній системі; B – ширина контакту манжети з поліетиленовим трубопроводом; $P_{\text{к}}$ – контактний тиск, який виникає під час монтажу манжет, МПа; $f_{\text{у.с}}$ – коефіцієнт тертя між поліетиленом та гумою (знаходиться в діапазоні 0,1...0,13).

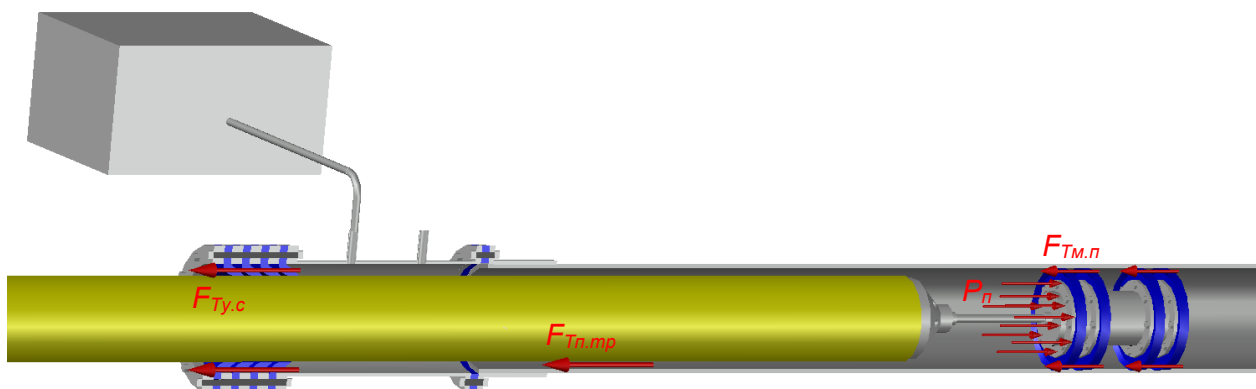


Рисунок 1.19 – Розрахункова схема протягування поліетиленового трубопроводу поршнем горизонтальною ділянкою трубопроводу [11, 75]

Можливість практичної реалізації ідеї протягування нового поліетиленового трубопроводу в деградований сталевий поршнем підтверджено експериментально (рисунок 1.20) [76].

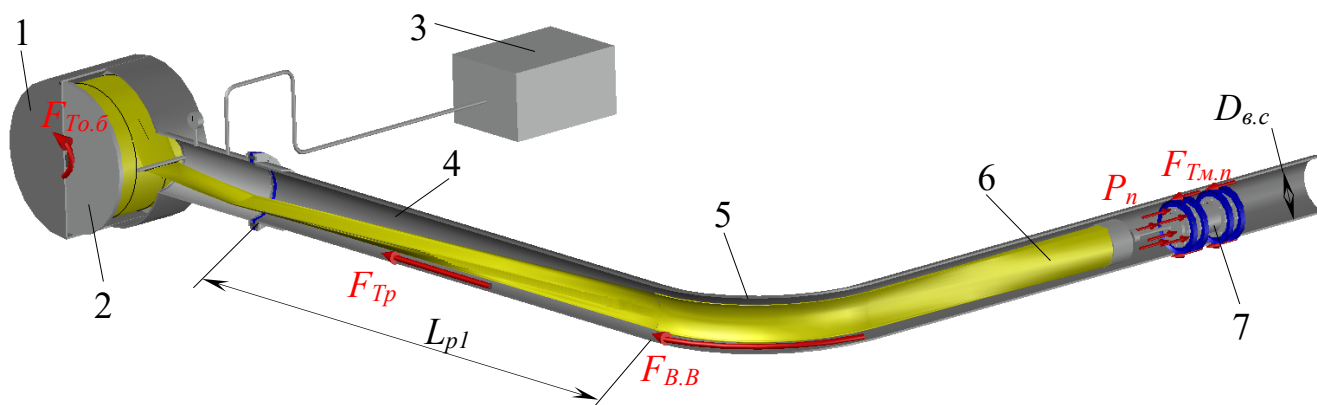
У [77, 78] теоретично та експериментально підтверджено можливість реалізації ідеї протягування поршнем рукава чи гнучкої композитної труби трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід. Щоб теоретично визначити чи можливо поршнем протягнути рукав трубопроводом з відводом визначено усі сили, які діють на рухоми систему під час протягування (рисунок 1.21) та записано рівняння рівномірного протягування



Рисунок 1.20 – Експериментальне протягування поліетиленової труби очисним поршнем в зношений сталевий трубопровід

$$\sum_{i=1}^n F_n = P_{\Pi} \frac{\pi D_{6.c}^2}{4} - F_{Tm.n} - F_{Tp} - F_{To.6} - F_{B.B} = 0, \quad (1.3)$$

де $F_{T_{м.п}}$ – сила тертя між манжетами поршня та стінкою трубопроводу у який протягується рукав; F_{T_p} – сила тертя між протягуваним поршнем рукавом та сталевією трубою; $F_{T_{о.б}}$ – сила тертя між осердям барабана на який намотано рукав та циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери на яких обертається барабан; $F_{B.B}$ – сила тертя зумовлена притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу у місці відводу, яке спричинено зміною напрямку протягування.



1 – герметична циліндрична камера; 2 – барабан; 3 – компресор; 4 – сталевий трубопровід; 5 – дефектний відвід; 6 – протягуваний рукав; 7 – поршень

Рисунок 1.21 – Розрахункова схема протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить відвід [77, 78]

Особливу увагу у [77, 78] зосереджено на визначенні сил тертя, зумовлених притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу у місці відводу. Для цього розглянуто розрахункову схему протягування рукава відводом (рисунок 1.22). Перед входом рукава у відвід у ньому діє сила натягу F_l , а після виходу з відводу F . У середній частині відводу діє сила реакції N .

Коли всі значення сил було визначено, отримали силу тертя зумовлену притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу у місці відводу

$$F_{B.B} = 2f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta.б}}{R_{\delta}}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left(1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right), \quad (1.4)$$

де f_p – коефіцієнт тертя між протягуваним поршнем рукавом та сталевим трубопроводом; q_p – вага погонного метра протягнутого поршнем рукава; L_{p1} – довжина протягнутого поршнем рукава до його входу у відвід; q_{δ} – вага барабана на який намотується протягуваний рукав; $f_{ков}$ – коефіцієнт тертя ковзання між осердям барабана на який намотано рукав та циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери на яких обертається барабан; r_{δ} – радіус циліндричних виступів в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери; R_{δ} – радіус осердя барабана на який намотується протягуваний рукав; φ – кут вигину відводу.

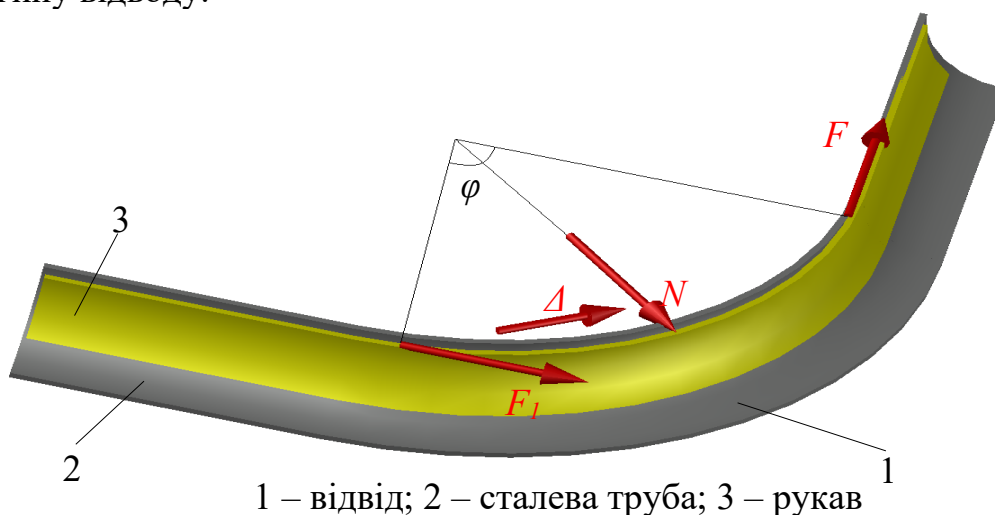


Рисунок 1.22 – Розрахункова схема протягування рукава відводом [77, 78]

Після аналітичного опису всіх силових взаємодій визначено необхідний надлишковий тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень протягував рукав трубопроводом, який містить відвід

$$P_{II} = \frac{4 \left(n_{m,n} f_{m,n} E h_m D_{\delta,c} \frac{D_{m,n} - D_{\delta,c}}{D_{m,n}} + f_p q_p L_p + \frac{q_{\delta} f_{ков} r_{\delta}}{R_{\delta}} + 2 f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\delta} f_{ков} r_{\delta}}{R_{\delta}}}{1 - 2 f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left(1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right) \right)}{\pi D_{\delta,c}^2}. \quad (1.5)$$

Отже, найефективнішим способом доставки ремонтної системи у важкодоступне деградоване місце трубопроводу є протягування її за допомогою поршня. Такий підхід забезпечує одночасно простоту реалізації, керованість процесу та проходження елементів трубопроводу складної геометрії, зокрема

відводів. Застосування поршнів із гіперпружних матеріалів [79, 80] завдяки їх гнучкості та здатності до пружної деформації забезпечить можливість легко долати фасонні елементи трубопроводів – відводи, трійники тощо [81-85].

1.4 Постановка задач та конкретизація мети досліджень

Сучасний стан трубопровідного транспорту в Україні загалом і газових та теплових мереж, зокрема, характеризується значним рівнем зношеності, наявністю численних корозійних ушкоджень і локальних дефектів. Традиційні траншейні методи моніторингу, ремонту передбачають виконання великих обсягів земляних робіт і потребують значних фінансових та трудових ресурсів, що робить їх малоефективними, особливо у щільній міській забудові або на важкодоступних ділянках трубопроводів. До таких належать ділянки трубопроводів, розташовані під автодорогами, залізницями, річками, будівлями, історичною інфраструктурою та іншими спорудами, де виконання відкритих ремонтних робіт є технічно неможливим.

Безтраншейні технології реновації, зокрема “труба в трубі”, SAPL і CIPP, дають змогу виконувати відновлення трубопроводів без розроблення траншеї, однак мають певні технологічні обмеження. Вони ефективні для протяжних деградованих ділянок, але малопридатні для локальних ремонтів або для застосування у важкодоступних місцях трубопроводів за крутовигнутими відводами, трійниками тощо. Доставка ремонтних систем до дефектів у такі важкодоступні місцях залишається нерозв’язаною технічною проблемою.

Тому особливої актуальності набуває питання розроблення нових підходів до внутрішньотрубного локального ремонту дефектів важкодоступних ділянок трубопроводів. Одним із перспективних напрямів є використання поршнів для протягування ремонтної системи до дефекту трубопроводу у важкодоступне місце. Такий метод не передбачає застосування зовнішньої тягової техніки. Важливою перевагою поршневого протягування є можливість роботи в складних конфігураціях трубопроводів, зокрема за наявності відводів і трійників, що

практично недосяжно для традиційних тягових систем. Визначення можливості здійснення таких операцій, розроблення технологічних рішень, які дадуть змогу доставити ремонтні системи поршнем у важкодоступні місця трубопроводу та встановити там ремонтні бандажі відкриває нові перспективи для локального внутрішньотрубного ремонту. Відсутність стандартизованих підходів до виконання таких операцій обмежує можливості практичного впровадження внутрішньотрубного ремонту в міських інженерних мережах. Тому актуальним є проведення теоретичних та експериментальних досліджень процесу протягування поршнем ремонтних систем трубопроводами, які містять крутовигнуті відводи, трійники, визначення закономірностей розподілу тиску, сил тертя, напружень та деформацій матеріалу, що дозволить сформулювати науково обґрунтовану методику розрахунку параметрів системи.

Тому метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних засад та технічних рішень для виконання внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж протягуванням ремонтних систем поршневыми засобами.

Щоб досягти поставлену мету треба вирішити такі завдання:

- аналітично дослідити процес доставки ремонтної системи поршнем до місця локального дефекту трубопроводу.

- дослідити особливості газодинамічних процесів, які відбуваються під час доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом до локального дефекту, розташованого за крутовигнутим відводом.

- експериментально дослідити процес протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводами, які містять фасонні елементи (крутовигнутий відвід, трійник).

- розробити, промислово апробувати та впровадити технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж протягуванням ремонтних систем поршневыми засобами і встановленням їх в місці важкодоступного локального дефекту трубопроводу.

Основні положення розділу опубліковані в працях [14, 15].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ ПОРШНЕМ РЕМОНТНОЇ СИСТЕМИ ДО МІСЦЯ ДЕФЕКТУ ТРУБОПРОВОДУ

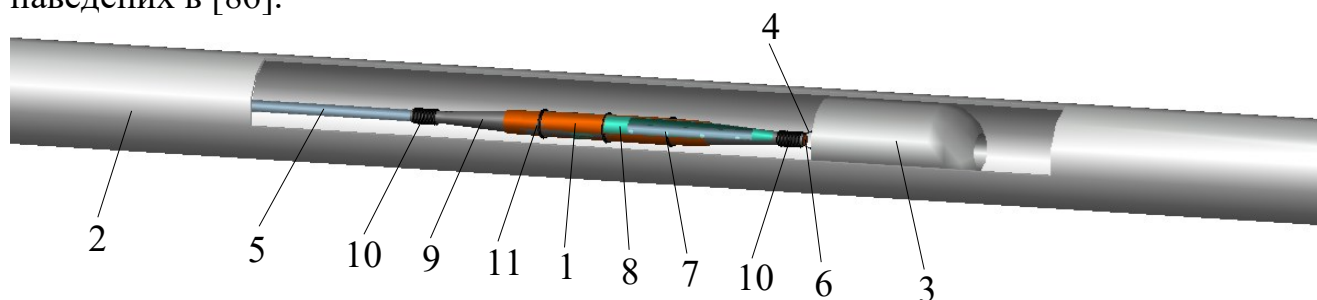
Запропоновано механіко-математичну модель для аналітичного дослідження процесу доставки ремонтної системи до місця локального дефекту трубопроводу. Сформульовано та розв'язано контактні задачі про фрикційну взаємодію ремонтної системи “гнучка трубка – ремонтний бандаж – поршень” з сталеною трубою на етапах руху до місця дефекту, примусової зупинки та розвантаження. Вивчено розподіл осьових сил, напружень, деформацій та видовжень у кусково-однорідній системі. CFD-моделюванням шляхом розв'язання системи рівнянь газової динаміки виконано аналіз газодинамічних процесів, які виникають під час доставки поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом до локального дефекту, розташованого у важкодоступному місці, за крутовигнутим відводом. Визначено закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на величину перепаду тиску на ньому, рушійну силу, величину максимальних напружень у гнучкій трубці та точність позиціювання пристрою. Встановлено умови застрягання поршнів з осьовим отвором у крутовигнутих відводах трубопроводу. Оцінено міцність дефектного трубопроводу підсиленого внутрішньотрубно встановленим бандажем.

2.1 Постановка задачі

Одним із перспективних підходів до доставки ремонтних систем у важкодоступне дефектне місце трубопроводів газотранспортних систем і теплових мереж є протягування їх поршнем (рисунок 2.1). Такий метод застосовують для виконання безтраншейної реновації протяжних деградованих внаслідок тривалого терміну експлуатації та корозійних процесів дефектних ділянок сталевих

трубопроводів шляхом протягування у їх порожнину поршнем поліетиленової труби [11, 75] чи рукава [77, 78].

Особливістю методу доставки ремонтних систем до важкодоступних дефектних місць трубопроводу, пошкоджених корозійними процесами є використання суцільнолитих поршнів, виготовлених із силіконового компаунда. Вони мають високу еластичність та здатність до деформації і тому можуть безперешкодно проходити фасонні елементи трубопроводів, зокрема крутовигнуті відводи і трійники [17, 79-85], однак для цього треба дотримуватись рекомендацій наведених в [86].



- 1 – ремонтний бандаж; 2 – трубопровід; 3 – поршень із осьовим отвором; 4 – тяга;
 5 – гнучка трубка; 6 – заглушка; 7 – отвір; 8 – еластична оболонка;
 9 – поліетиленова плівка; 10, 11 – зав'язка

Рисунок 2.1 – Схема протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом

Щоб поршень 3 (рисунок 2.1) загальмувати одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу 2 до нього кріплять гнучку трубку 5, яку закріплюють до осердя барабана і намотують на нього. Барабан поміщають у прикріплену до початку трубопроводу герметичну камеру. Також через гнучку трубку 5 подать повітря у еластичну оболонку 8 для притискання ремонтного бандажу 1 до внутрішньої стінки після доставки ремонтної системи до місця локального дефекту стінки трубопроводу 2. Щоб уникнути надмірного збільшення запоршневого тиску, коли поршень загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу, що може призвести до розриву гнучкої трубки 5 (рисунок 2.1), до якого він прикріплений, конструкція поршня 3 передбачає осьовий наскрізний отвір. Такі поршні називають байпасними, тобто поршні, які мають центральний

отвір вздовж осі, який забезпечує перетікання робочого середовища та зниження навантаження зумовленого тиском. Швидкість переміщення поршня, перепад тиску на ньому під час руху трубопроводом [87, 88], ризик застрягання у трубопроводі, особливо в місці крутовигнутих відводів, а також величина тягового зусилля, з яким поршень здатний протягнути ремонтну систему істотно залежать від діаметра осьового отвору в поршні. Також від перепаду тиску на поршні, коли він загальмував одразу за місцем локального дефекту, а подавання повітря компресором вчасно не зупинене, залежить міцність гнучкої трубки до якої він прикріплений. Тому необхідно визначити оптимальний діаметр осьового отвору в поршні.

Щоб виконати аналіз процесу доставки ремонтної системи трубопроводом до місця локального дефекту поршнем з осьовим отвором його розділено на три етапи:

- протягування поршнем під тиском повітря ремонтної системи сталевим трубопроводом до місця дефекту. Поршень протягує не тільки ремонтну систему, а і гнучку трубку, яка розмотується з барабана на необхідну довжину;

- повне розмотування прикріпленої до осі барабана гнучкої трубки і гальмування поршня безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби (до припинення подавання повітря компресором). У такому випадку сила, яка діє на зупинений поршень досягає максимальної величини;

- припинення подавання повітря компресором. Тиск повітря у запоршневому просторі зменшується до нуля, що призводить до розвантаження системи.

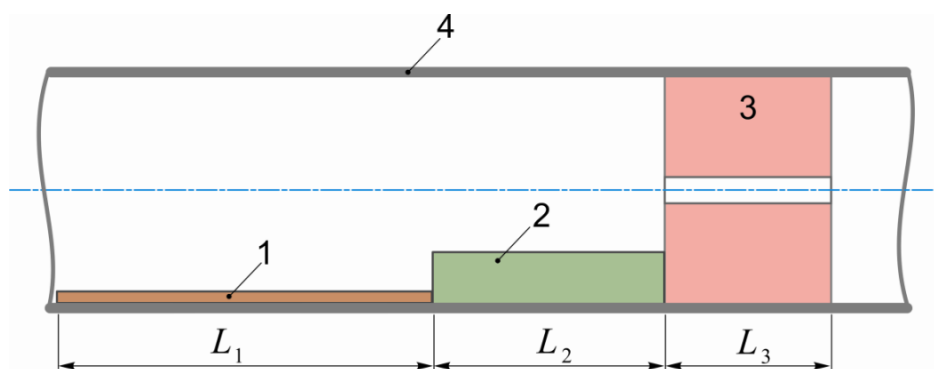
Щоб оцінити міцність елементів системи на усіх етапах доставки та забезпечити точне позиціювання ремонтного бандажа у місці дефекту здійснимо дослідження напружено-деформованого стану системи “гнучка трубка – ремонтний бандаж – поршень” на усіх етапах, враховуючи пружне деформування кожної компоненти та тертя з трубою.

2.2 Аналітична модель рухомої системи та розрахункова схема

Рухому систему розглядаємо як східчастий кусково-однорідний пружний стержень (рисунок 2.2), яка містить гнучку трубку 1, ремонтний бандаж 2 та поршень із осьовим отвором 3.

Навантаження стержня здійснюється рушійною силою, прикладеною до тильного торця поршня, та силами тертя на бічній поверхні. Матеріал труби газопроводу вважаємо абсолютно жорстким.

Надалі усі величини, які стосуються гнучкої трубки, ремонтного бандажа та поршня із осьовим отвором позначимо індексами 1, 2 та 3 відповідно.



1 – гнучка трубка; 2 – ремонтний бандаж; 3 – поршень із осьовим отвором;
4 – трубопровід

Рисунок 2.2 – Схема доставки поршнем ремонтного бандажа до місця дефекту трубопроводу

Спочатку розглянемо загальну задачу деформування неоднорідного стержня змінного поперечного перерізу (рисунок 2.3).

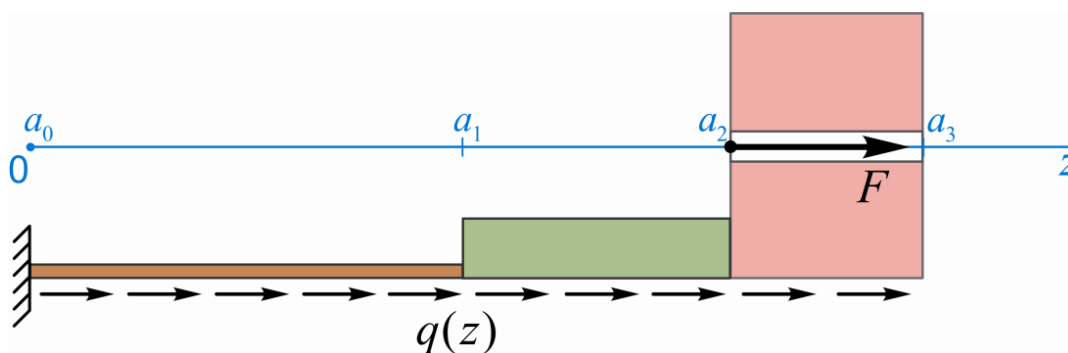


Рисунок 2.3 – Загальна схема навантаження кусково-однорідного східчастого стержня

Виберемо декартову систему координат Oz , сумістивши її початок з місцем запускання поршня та скерувавши вісь z у напрямку руху поршня (рисунок 2.3).

Нехай L_i ($i = 1, 2, 3$) – довжина кожної з ділянок стержня. Тоді $a_0 = 0$, $a_1 = L_1$, $a_2 = L_1 + L_2$, $a_3 = L_1 + L_2 + L_3$ – характерні координати точок розмежування ділянок.

Вважаємо, що стержень навантажений силою F у перерізі $z = a_2$ та погонним навантаженням $q(z)$ на бічній поверхні. Лівий кінець стержня закріплений, правий – вільний від навантаження. Додатній напрям F і q співпадає з напрямком осі z .

Запишемо ключові співвідношення моделі:

- рівняння рівноваги

$$\frac{dN}{dz} + F\delta(z - a_2) + q(z) = 0, \quad z \in (0, a_3); \quad (2.1)$$

- синтез напружень

$$\sigma(z) = \frac{N(z)}{A(z)}, \quad z \in (0, a_3); \quad (2.2)$$

- закон Гука

$$\varepsilon(z) = \frac{\sigma(z)}{E(z)}, \quad z \in (0, a_3); \quad (2.3)$$

- співвідношення Коші

$$\frac{du}{dz} = \varepsilon(z), \quad z \in (0, a_3); \quad (2.4)$$

- крайові умови

$$u(0) = 0, \quad (2.5)$$

$$N(a_3) = 0, \quad (2.6)$$

де N – осьова сила, Н; q – розподілене бічне навантаження, Н/м; σ – осьове напруження, Па; ε – осьова деформація; u – осьове видовження, м; $A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ – площа поперечного перерізу, м²; D, d – зовнішній та внутрішній діаметри, м; E – модуль Юнга матеріалу, Па; $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака, 1/м.

Розв'яжемо задачу (2.1)–(2.6). Інтегруючи диференціальне рівняння (2.1) з урахуванням крайової умови (2.6), знаходимо осьову силу у стержні

$$N(z) = \int_z^{a_3} (F\delta(\zeta - a_2) + q(\zeta))d\zeta. \quad (2.7)$$

За формулами (2.2), (2.3) визначаємо напруження та деформацію

$$\sigma(z) = \frac{1}{A(z)} \int_z^{a_3} (F\delta(\zeta - a_2) + q(\zeta))d\zeta, \quad (2.8)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{E(z)A(z)} \int_z^{a_3} (F\delta(\zeta - a_2) + q(\zeta))d\zeta. \quad (2.9)$$

Тоді, інтегруючи диференціальне рівняння (2.4) за умови (2.5), знаходимо вираз для осьового видовження

$$u(z) = \int_0^z \left(\frac{1}{E(\zeta)A(\zeta)} \int_\zeta^{a_3} (F\delta(\xi - a_2) + q(\xi))d\xi \right) d\zeta. \quad (2.10)$$

Таким чином, формули (2.7)–(2.10) дають аналітичний розв'язок задачі про рівновагу неоднорідного пружного стержня змінного поперечного перерізу, навантаженого силою F у точці $z = a_2$ та розподіленими вздовж поверхневими силами $q(z)$. Значення F та $q(z)$ будуть конкретизовані на кожному з трьох етапів доставляння.

2.3 Аналітичний розв'язок

2.3.1 Попередні зауваження

Зауваження 1. Дотичні сили $q(z)$ є не що інше, як сили тертя, які підпорядковуються закону Кулона, а саме, на ділянках проковзування за модулем дорівнюють добутку коефіцієнта тертя на погонну вагу стержня та орієнтовані проти напрямку ковзання, а на ділянках зчеплення не перевищують силу тертя

спокою. Взаємодію неоднорідного стержня з трубою описуємо системою альтернативних нерівностей контакту тертя [89-91]

$$q(z) = -\tau(z) \operatorname{sgn} \dot{u}(z), \quad \dot{u} \neq 0; \quad (2.11)$$

$$\dot{u}(z) = 0, \quad |q(z)| \leq \tau(z), \quad (2.12)$$

де $\tau(z) = f(z)\rho(z)gA(z)$ – модуль сили тертя, Н/м; $\dot{u}$ – швидкість проковзування, м/с; f – коефіцієнт тертя в парі “стержень–труба”; ρ – густина матеріалу стержня, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Зауваження 2. Зазначимо, що $A(z)$, $D(z)$, $d(z)$, $E(z)$, $f(z)$, $\rho(z)$, $\tau(z)$ є заданими кусково-сталими функціями від координати, які описують спектр геометричних та механічних параметрів системи

$$\begin{aligned} A(z) &= A_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ D(z) &= D_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ d(z) &= d_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ E(z) &= E_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ f(z) &= f_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ \rho(z) &= \rho_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ \tau(z) &= \tau_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3; \\ \tau_i &= f_i \rho_i g A_i, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.3.2 Етап протягування поршнем ремонтної системи сталевим трубопроводом до місця дефекту

На цьому етапі проковзування з додатною швидкістю спостерігається на усіх ділянках контакту (рисунок 2.4), тобто $\operatorname{sgn} \dot{u}(z) = 1$, $z \in (0, a_3)$.

Тоді

$$q(z) = -\tau(z) = -\tau_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.14)$$

Рух та деформування системи відбувається під дією деякої наперед невідомої сили $F = F_1$.

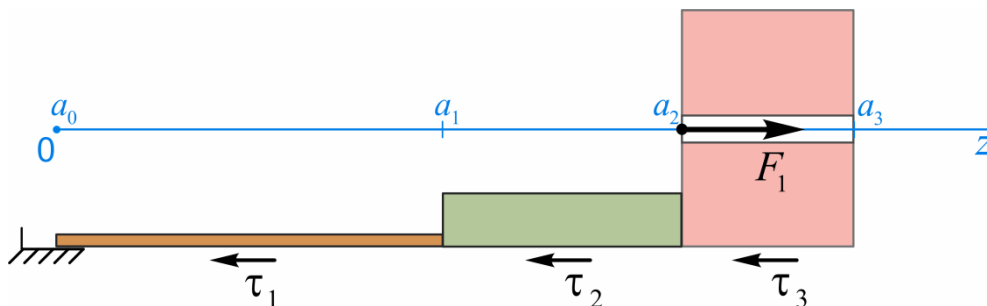


Рисунок 2.4 – Протягування поршнем ремонтної системи сталевим трубопроводом до місця дефекту

Зазначимо, що в цих дослідженнях не розглядаємо подробиці процесу зрушування з місця пружного поршня та ремонтного бандажа (в режимі попереднього зміщення [92, 93]), тому одразу приймаємо, що $F_1 > F_0 = \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3$ (порогове значення перевищено).

Істинне значення рушійної сили F_1 , яка діє на систему, знайдемо з умови відсутності навантаження на осі барабана з якого розмотується гнучка трубка

$$N(0) = 0. \quad (2.15)$$

Враховуючи умову (2.15), із виразу (2.7) знаходимо

$$F_1 = \int_0^{a_3} \tau(\zeta) d\zeta = \tau_1 L_1 + \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3. \quad (2.16)$$

Таким чином, на першому етапі руху на систему діють активна сила (2.16) та реактивні сили (2.14). Розв'язок задачі для цього випадку отримуємо, підставляючи співвідношення (2.14), (2.16) у загальні формули (2.7)–(2.10).

Під час обчислення інтегралів врахували значення кусково-сталих функцій (2.13) та очевидні співвідношення $a_i - a_{i-1} = L_i$, $i = 1, 2, 3$.

У підсумку отримали

$$N(z) = \begin{cases} \tau_1 z, & z \in (a_0, a_1) \\ \tau_1 L_1 + \tau_2 (z - a_1), & z \in (a_1, a_2); \\ -\tau_3 (a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\sigma(z) = \begin{cases} \frac{\tau_1}{A_1} z, & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{1}{A_2} (\tau_1 L_1 + \tau_2 (z - a_1)), & z \in (a_1, a_2); \\ -\frac{\tau_3}{A_3} (a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{\tau_1}{E_1 A_1} z, & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{1}{E_2 A_2} (\tau_1 L_1 + \tau_2 (z - a_1)), & z \in (a_1, a_2); \\ -\frac{\tau_3}{E_3 A_3} (a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases} \quad (2.19)$$

$$u(z) = \begin{cases} \frac{\tau_1}{E_1 A_1} \frac{z^2}{2}, & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{\tau_1}{E_1 A_1} \frac{L_1^2}{2} + \frac{1}{E_2 A_2} \left(\tau_1 L_1 (z - a_1) + \tau_2 \frac{(z - a_1)^2 - a_1^2}{2} \right), & z \in (a_1, a_2) \\ \frac{\tau_1}{E_1 A_1} \frac{L_1^2}{2} + \frac{1}{E_2 A_2} \left(\tau_1 L_1 L_2 + \tau_2 \frac{L_2^2 - L_1^2}{2} \right) - \frac{\tau_3}{E_3 A_3} \frac{L_3^2 - (a_3 - z)^2}{2}, & z \in (a_2, a_3) \end{cases} \quad (2.20)$$

Аналізуючи результат (2.17), легко переконатися, що у точці $z = a_2$ осьова сила має розрив першого роду

$$N(a_2 - 0) - N(a_2 + 0) = \tau_1 L_1 + \tau_2 (a_2 - a_1) - (-\tau_3 (a_3 - a_2)) = \tau_1 L_1 + \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3 = F_1.$$

2.3.3 Етап гальмування поршня безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби (до припинення подавання повітря компресором)

Коли поршень буде безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби гнучка трубка повністю розмотається з барабана. Так як вона закріплена до осі барабана, то вона загальмує поршень наближено на дистанції L_1 (рисунок 2.5). При цьому компресор миттєво виключити неможливо і він продовжить деякий час подавати повітря у запоршневий простір, створюючи найбільшу рушійну силу

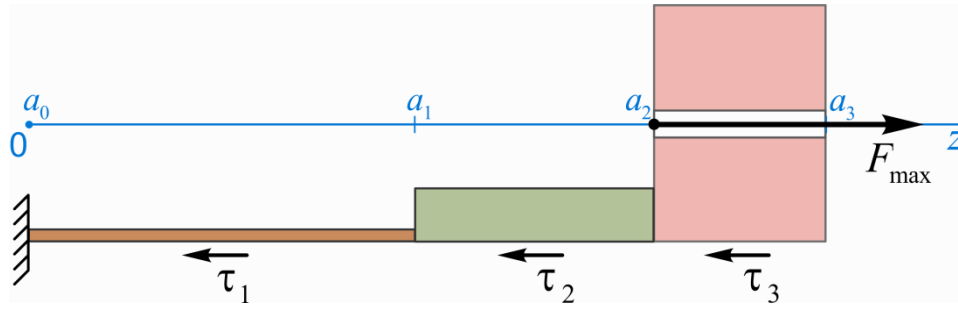


Рисунок 2.5 – Зупинка системи доставки ремонтного бандажа з увімкнутим компресором

$$F = F_{\max}, \quad (2.21)$$

яка продовжує деформувати (розтягувати) систему.

Величина цієї сили принципово залежить від діаметра осевого отвору в поршні d_3 і визначена методом CFD моделювання (підрозділ 2.5).

Напрямок ковзання залишається таким, як на попередньому етапі. Тому

$$q(z) = -\tau(z) = -\tau_i, \quad z \in (a_{i-1}, a_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.22)$$

Підставляючи значення (2.21), (2.22) у загальні вирази (2.7)–(2.10), після обчислення інтегралів отримаємо розв’язок задачі на етапі зупинки

$$N(z) = \begin{cases} F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3, & z \in (a_0, a_1) \\ F_{\max} - \tau_2(a_2 - z) - \tau_3 L_3, & z \in (a_1, a_2) \\ -\tau_3(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.23)$$

$$\sigma(z) = \begin{cases} \frac{1}{A_1}(F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3), & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{1}{A_2}(F_{\max} - \tau_2(a_2 - z) - \tau_3 L_3), & z \in (a_1, a_2) \\ -\frac{\tau_3}{A_3}(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.24)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{1}{E_1 A_1}(F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3), & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{1}{E_2 A_2}(F_{\max} - \tau_2(a_2 - z) - \tau_3 L_3), & z \in (a_1, a_2) \\ -\frac{\tau_3}{E_3 A_3}(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.25)$$

$$u(z) = \begin{cases} \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)z + \tau_1 \frac{z^2}{2} \right), & z \in (a_0, a_1) \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)L_1 + \tau_1 \frac{L_1^2}{2} \right) + \frac{1}{E_2 A_2} \left((F_{\max} - F_1 + \tau_1 L_1)(z - a_1) + \tau_2 \frac{(z - a_1)^2}{2} \right), & z \in (a_1, a_2) \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)L_1 + \tau_1 \frac{L_1^2}{2} \right) + \frac{1}{E_2 A_2} \left((F_{\max} - F_1 + \tau_1 L_1)L_2 + \tau_2 \frac{L_2^2}{2} \right) - \\ - \frac{\tau_3}{E_3 A_3} \frac{L_3^2 - (a_3 - z)^2}{2}, & z \in (a_2, a_3) \end{cases} \quad (2.26)$$

Як видно з формули (2.23), осьова сила має заданий розрив у точці $z = a_2$
 $N(a_2 - 0) - N(a_2 + 0) = F_{\max}$, а на барабан передається навантаження

$$N(0) = F_{\max} - F_1. \quad (2.27)$$

2.3.4 Етап припинення подавання повітря компресором (розвантаження)

При розвантаженні від $F_{\max}$ до нульового значення рушійної сили уся довжина стержня $z \in (a_0, a_3)$ розділяється на дві ділянки: $z \in (a_0, b)$ – зона спокою та $z \in (b, a_3)$ – зона зворотного проковзування (рисунок 2.6). У зоні спокою ситуація залишається замороженою (як при $F = F_{\max}$), а у зоні зворотного проковзування сили тертя змінюють знак на протилежний. Точка розмежування цих областей наперед невідома.

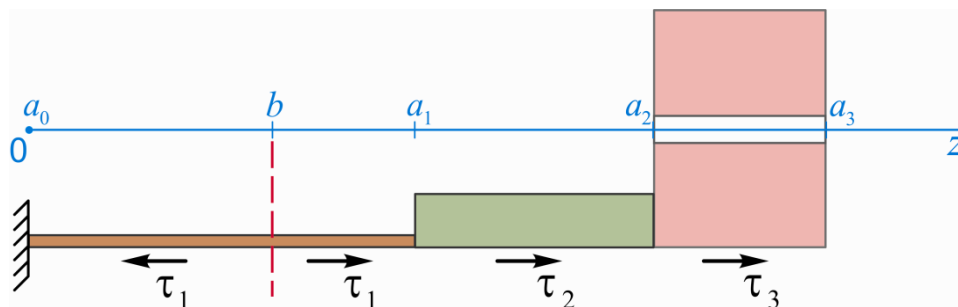


Рисунок 2.6 – Розвантаження системи після зупинки

Отож, розглядаємо випадок повного розвантаження

$$F = 0. \quad (2.28)$$

У цьому разі

$$\operatorname{sgn} \dot{u} = \begin{cases} 0, & z \in (a_0, b) \\ -1, & z \in (b, a_3) \end{cases}.$$

Тоді

$$q(z) = \begin{cases} -\tau_1, & z \in (a_0, b) \\ \tau_1, & z \in (b, a_1) \\ \tau_2, & z \in (a_1, a_2) \\ \tau_3, & z \in (a_2, a_3) \end{cases}. \quad (2.29)$$

Після обчислення інтегралів (2.7)–(2.10) з урахуванням формул (2.28)–(2.29) отримали розв'язок задачі на етапі повного розвантаження

$$N(z) = \begin{cases} F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3, & z \in (a_0, b) \\ \tau_1(a_1 - z) + \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3, & z \in (b, a_1) \\ \tau_2(a_2 - z) + \tau_3 L_3, & z \in (a_1, a_2) \\ \tau_3(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.30)$$

$$\sigma(z) = \begin{cases} \frac{1}{A_1}(F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3), & z \in (a_0, b) \\ \frac{1}{A_1}(\tau_1(a_1 - z) + \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3), & z \in (b, a_1) \\ \frac{1}{A_2}(\tau_2(a_2 - z) + \tau_3 L_3), & z \in (a_1, a_2) \\ \frac{\tau_3}{A_3} \tau_3(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.31)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{1}{E_1 A_1}(F_{\max} - \tau_1(a_1 - z) - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3), & z \in (a_0, b) \\ \frac{1}{E_1 A_1}(\tau_1(a_1 - z) + \tau_2 L_2 + \tau_3 L_3), & z \in (b, a_1) \\ \frac{1}{E_2 A_2}(\tau_2(a_2 - z) + \tau_3 L_3), & z \in (a_1, a_2) \\ \frac{\tau_3}{E_3 A_3} \tau_3(a_3 - z), & z \in (a_2, a_3) \end{cases}; \quad (2.32)$$

$$u(z) = \begin{cases} \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)z + \tau_1 \frac{z^2}{2} \right), & z \in (a_0, b) \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)b + \tau_1 \frac{b^2}{2} + F_1(z - b) - \tau_1 \frac{z^2 - b^2}{2} \right), & z \in (b, a_1) \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)b + \tau_1 \frac{b^2}{2} + F_1(a_1 - b) - \tau_1 \frac{a_1^2 - b^2}{2} \right) + \\ + \frac{1}{E_2 A_2} \left((F_1 - \tau_1 L_1)(z - a_1) - \tau_2 \frac{(z - a_1)^2}{2} \right), & z \in (a_1, a_2) \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\max} - F_1)b + \tau_1 \frac{b^2}{2} + F_1(a_1 - b) - \tau_1 \frac{a_1^2 - b^2}{2} \right) + \frac{1}{E_2 A_2} \left((F_1 - \tau_1 L_1)L_2 - \tau_2 \frac{L_2^2}{2} \right) - \\ - \frac{\tau_3}{E_3 A_3} \frac{L_3^2 - (a_3 - z)^2}{2}, & z \in (a_2, a_3) \end{cases} . \quad (2.33)$$

Невідому координату розмежування областей спокою та зворотного проковзування знайдемо з умови неперервності осьової сили $N(b-0) = N(b+0)$, яка на підставі виразів (2.31), (2.16) виглядає так

$$F_{\max} - F_1 + \tau_1 b = F_1 - \tau_1 b . \quad (2.34)$$

Звідси

$$b = \frac{2F_1 - F_{\max}}{2\tau_1} . \quad (2.35)$$

Корінь (2.35) рівняння (2.34) є додатним, якщо $2F_1 - F_{\max} > 0$, тобто для “довгих” дистанцій, коли

$$L_1 > L_* = \frac{F_{\max} - 2F_0}{2\tau_1} . \quad (2.36)$$

У разі “коротких” трубок ($L_1 < L_*$) $b < 0$. Тоді у розв’язку (2.30)–(2.33) треба покласти $b = 0$ – зона зворотного проковзування охоплює усю довжину стержня.

2.4 Аналіз результатів та рекомендації

2.4.1 Приклад розрахунку напружено-деформованого стану

Вхідні дані для розрахунку та окремі проміжні результати розрахунків

наведено у таблиці 2.1. Розглянуто два випадки: $L_1 = 40$ м – чисельник та $L_1 = 100$ м – знаменник.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані та результати проміжних розрахунків

Тип даних	Величина, розмірність	Гнучка трубка ($i=1$)	Ремонтний бандаж ($i=2$)	Поршень ($i=3$)
Вхідні дані	D_i , м	0,009	0,049	0,049
	d_i , м	0,006	–	0,01
	L_i , м	$\frac{40}{100}$	0,16	0,06
	E_i , Па	$1.1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^7$
	f_i	0,4	0,6	0,8
	ρ_i , кг/м ³	1132	790	1100
	g , м/с ²	9,807		
	ρ , кг/м ³	1		
	Q , м ³ /с	0,007		
	C_d	0,62		
Проміжні розрахунки	a_i , м	$\frac{40}{100}$	$\frac{40,16}{100,16}$	$\frac{40,22}{100,22}$
	A_i , м ²	$3,534 \cdot 10^{-5}$	$3,534 \cdot 10^{-5}$	$1,807 \cdot 10^{-3}$
	τ_i , Н/м	0,157	0,164	15,596
	$\tau_i L_i$, Н	$\frac{6,278}{15,694}$	0,026	0,936
	F_0 , Н	0,962		
	F_1 , Н	$\frac{7,240}{16,656}$		
	$F_{\max}$, Н	18,673		
	b , м	$\frac{0}{46,51}$		

Коефіцієнти тертя між гнучкою полівінілхлоридною трубкою, ремонтним бандажем, поршнем та металом внутрішньої стінки трубопроводу, який має тривалий термін експлуатації, не є фіксованою величиною, а залежить від багатьох чинників, зокрема, істотний вплив мають матеріали, з яких виготовлені

контактуючі елементи, стан металу (сухий або наявність вологи), шорсткість поверхні, швидкості ковзання, умови контакту тощо. Додатковими чинниками можуть бути відкладення на внутрішній поверхні трубопроводу спричинені корозійними процесами, наліт, окалина, накип або інші забруднення.

Для розглянутого прикладу розрахунку прийнято коефіцієнт тертя ковзання $f_1=0,4$ для пари полівінілхлоридна гнучка трубка – внутрішня поверхня сталевго трубопроводу, $f_2=0,6$ для пари ремонтний бандаж із тканого текстилю – внутрішня поверхня сталевго трубопроводу та $f_3=0,8$ для пари поршень із силіконового компаунда – внутрішня поверхня сталевго трубопроводу. Усі коефіцієнти тертя прийнято для сухого контакту.

Розрахунки основних характеристик напружено-деформованого стану системи на усіх етапах доставки за формулами (2.17)–(2.20), (2.23)–(2.26) та (2.30)–(2.33) проведено в середовищі MATHCAD.

Графічна інтерпретація результатів для випадків “короткої” ($L_1 = 40$ м) та “довгої” ($L_1 = 100$ м) дистанції подана відповідно на рисунках 2.6, 2.7 та 2.8, 2.9. Оскільки $L_1 \gg L_2 + L_3$, графіки складаються з двох частин: зліва ($z \in [0, L_1]$) зображена ситуація у трубці, а справа ($z \in [L_1, L_1 + 0.22]$) у іншому масштабі довжини – у ремонтному бандажі та в поршні.

Огляд наведених графіків показує, що осьова сила, напруження та деформація є загалом кусково-лінійними функціями від координати з розривами в тильній частині поршня. Осьове видовження є неперервною кусково-параболічною функцією на усіх етапах.

Принципова відмінність результатів для $L_1 = 40$ м та $L_1 = 100$ м полягає у структурі зони зворотного проковзування $z \in (b, a_3)$. У першому випадку $b=0$, у другому – $b = 46,51$ м.

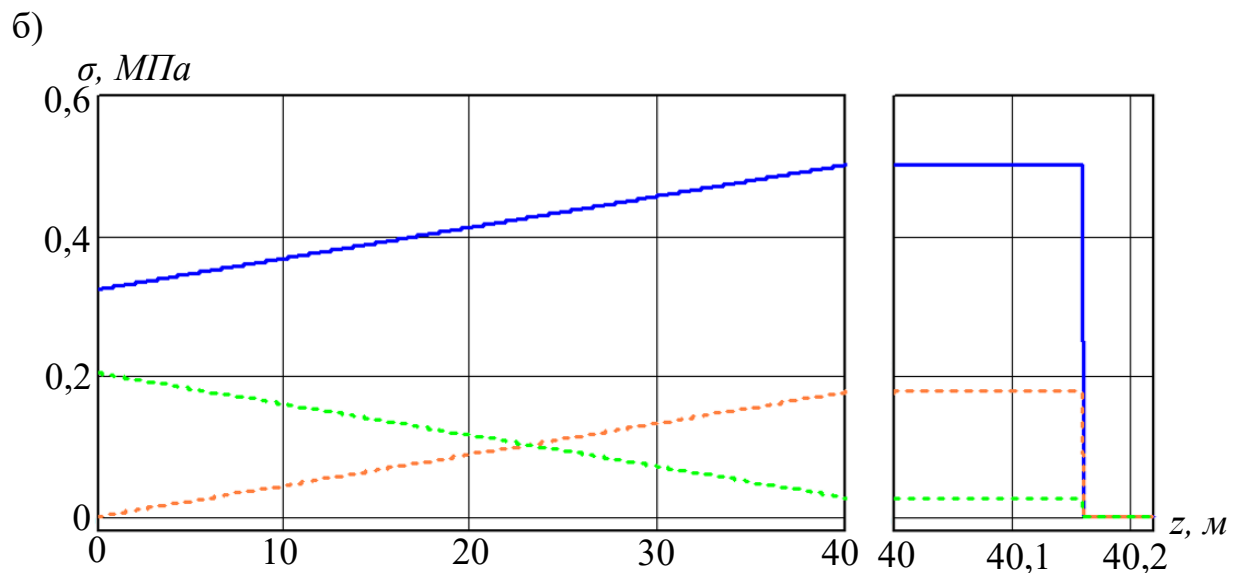
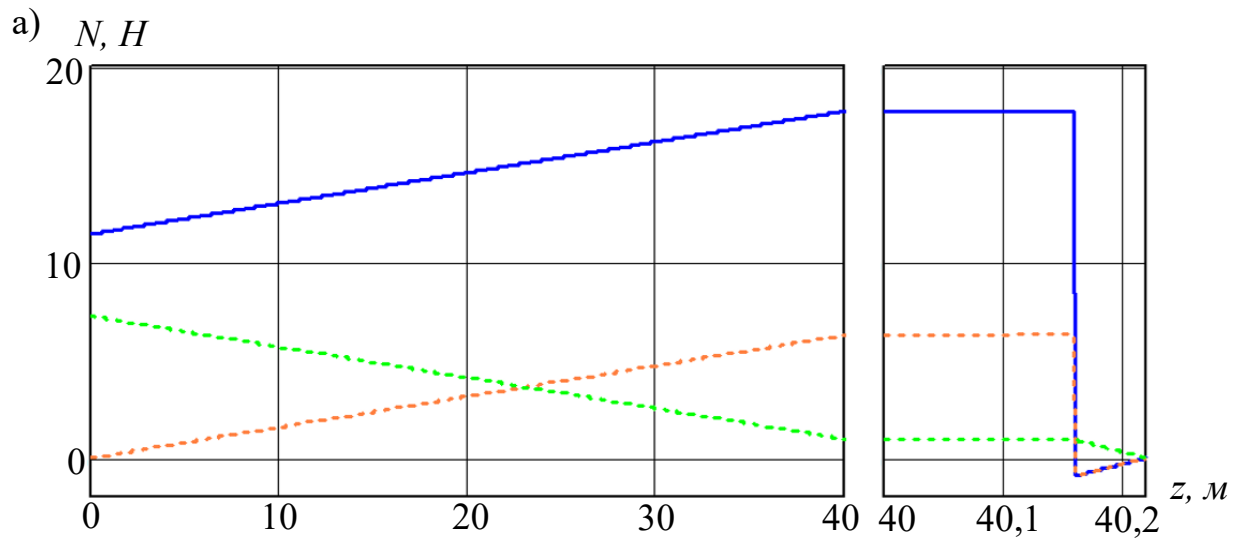


Рисунок 2.7 – Розподіл осьової сили (а) та напруження (б) у системі з гнучкою трубкою завдовжки 40 м: помаранчеві лінії – рух до пункту призначення ((2.17), (2.18)), сині – гальмування з увімкнутим компресором ((2.23), (2.24)), зелені – залишкові явища після розвантаження ((2.30), (2.31))

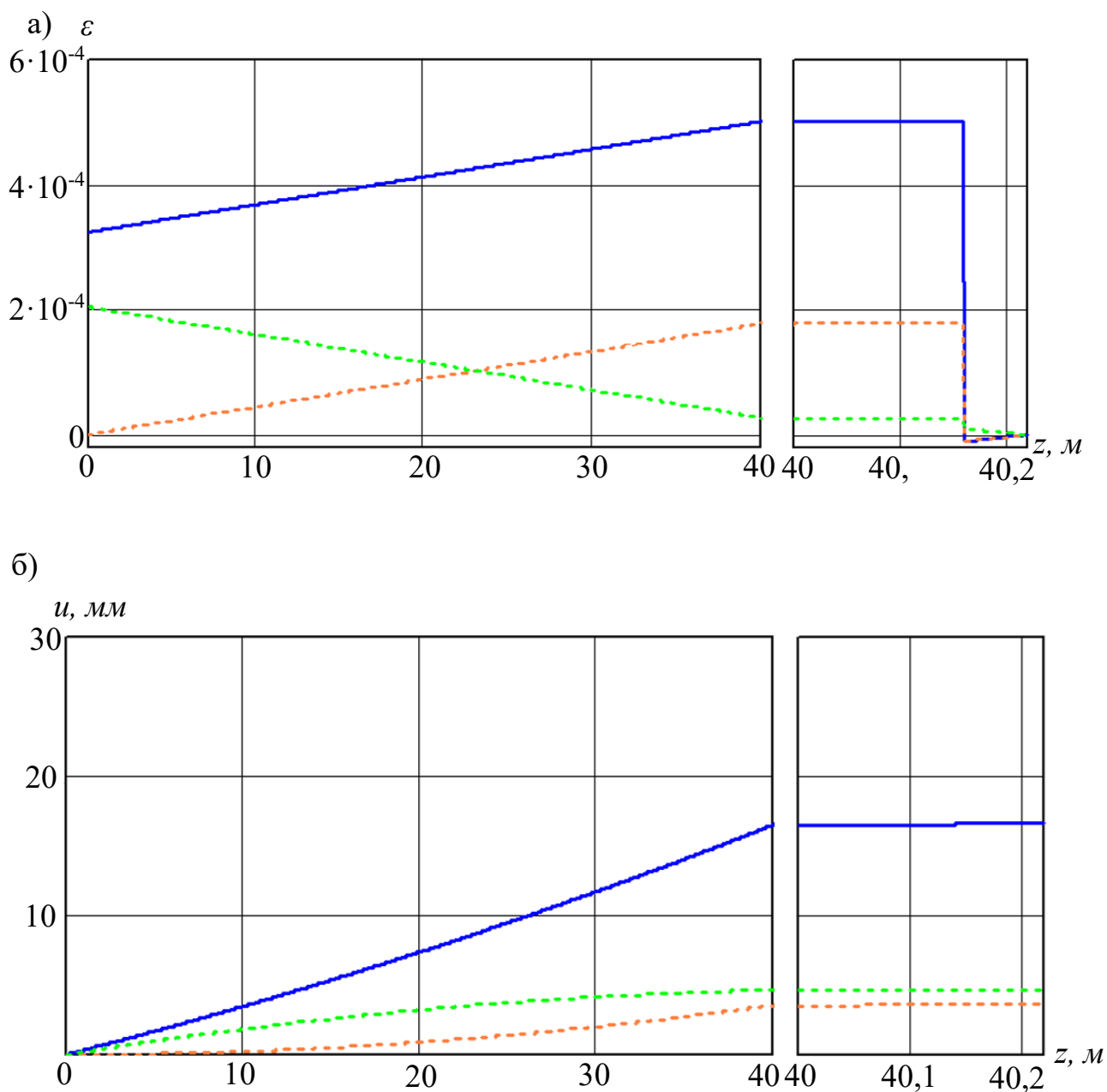


Рисунок 2.8 – Розподіл осьової деформації (а) та видовження (б) у системі з гнучкою трубкою завдовжки 40 м: помаранчеві лінії – рух до пункту призначення ((2.19), (2.20)), сині – зупинка з увімкнутим компресором ((2.25), (2.26)), зелені – залишкові явища після розвантаження ((2.32), (2.33))

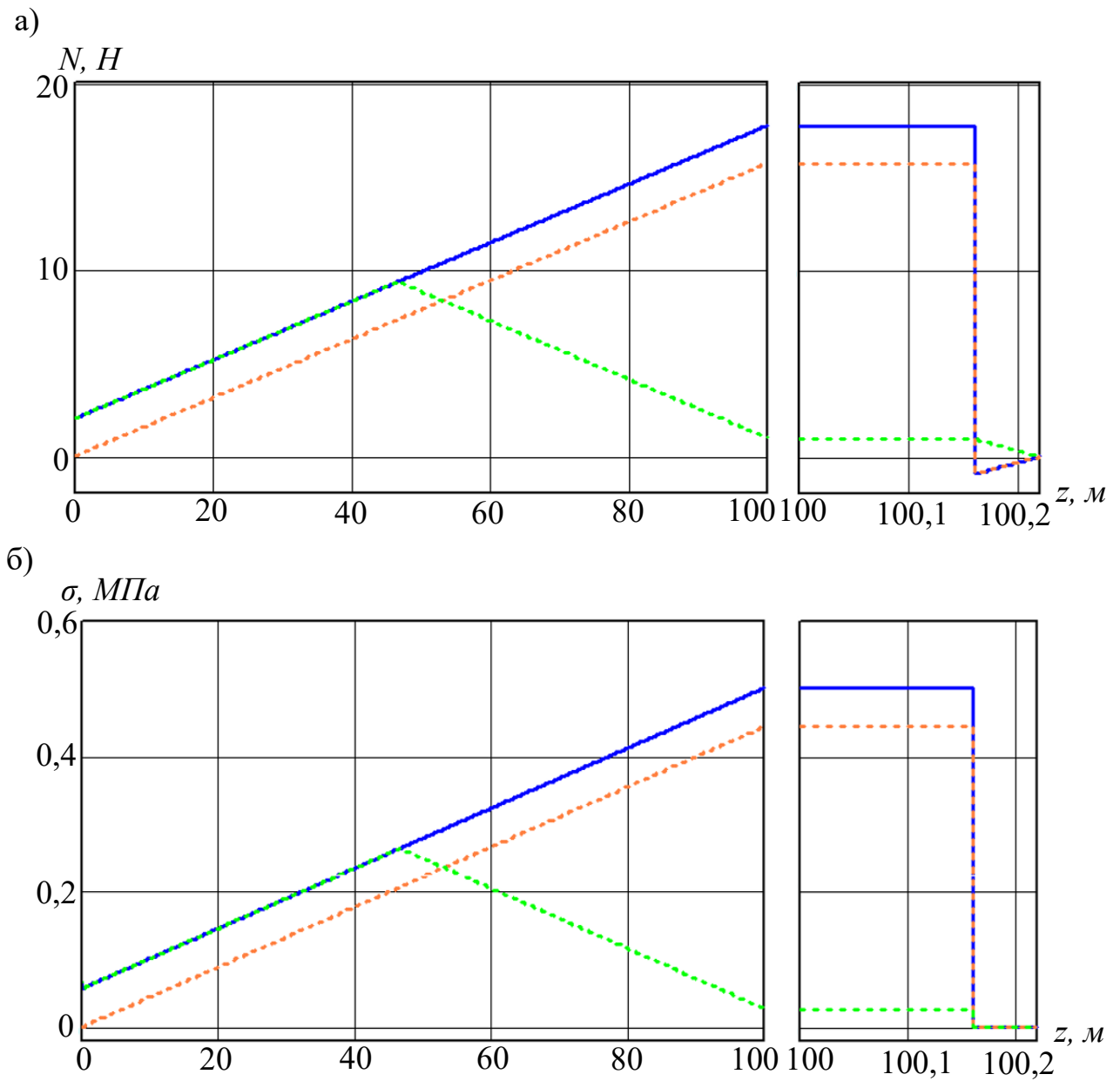


Рисунок 2.9 – Розподіл осьової сили (а) та напруження (б) у системі з гнучкою трубкою завдовжки 100 м: помаранчеві лінії – рух до пункту призначення ((2.17), (2.18)), сині – зупинка з увімкнутим компресором ((2.23), (2.24)), зелені – залишкові явища після розвантаження ((2.30), (2.31))

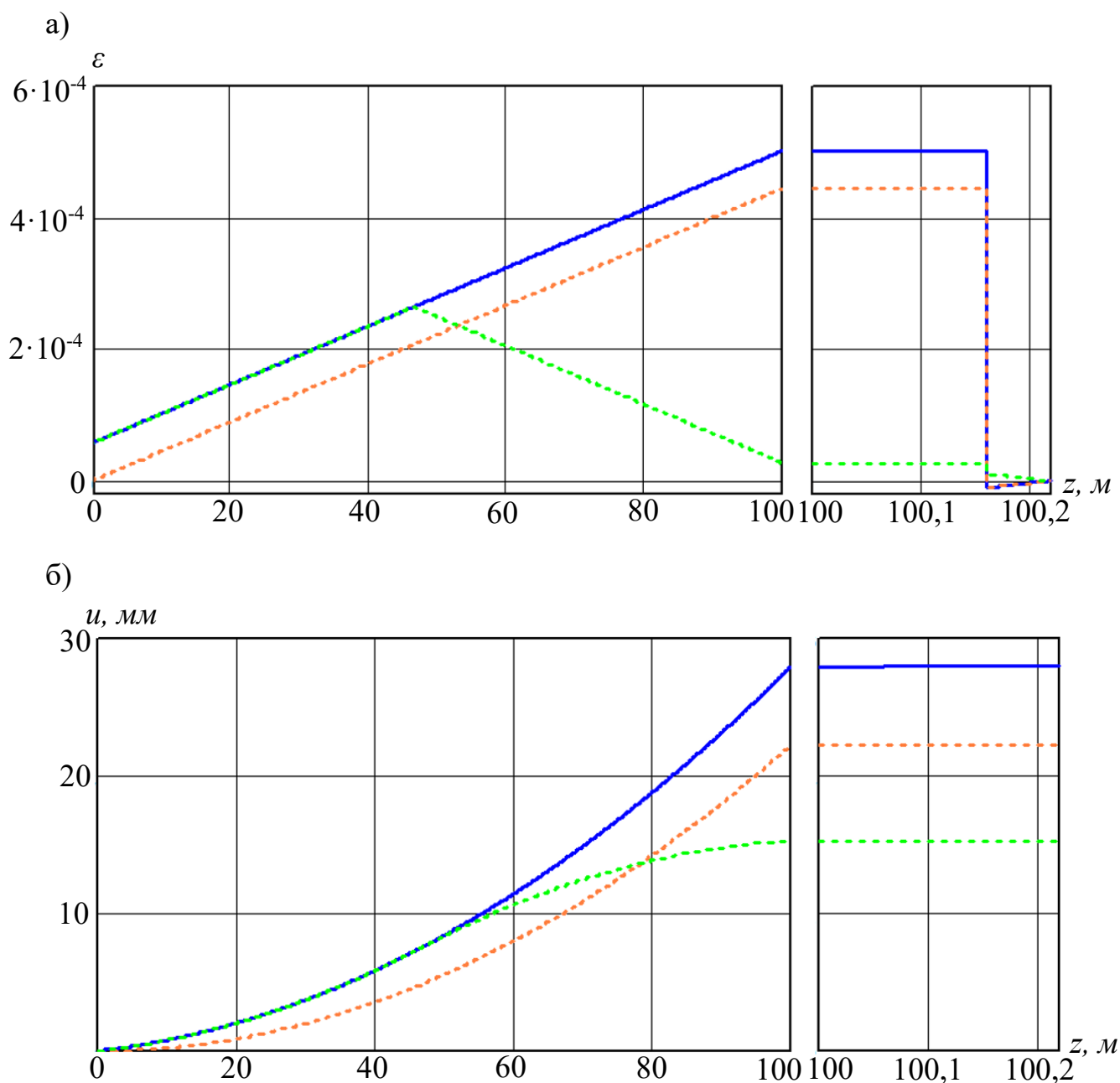


Рисунок 2.10 – Розподіл осьової деформації (а) та видовження (б) у системі з гнучкою трубкою завдовжки 100 м: помаранчеві лінії – рух до пункту призначення ((2.19), (2.20)), сині – зупинка з увімкнутим компресором ((2.25), (2.26)), зелені – залишкові явища після розвантаження ((2.32), (2.33))

2.4.2 Ключові впливи та практичні рекомендації

Базовим параметром системи доставки ремонтного бандажа до місця дефекту трубопроводу, яким може маніпулювати конструктор, є діаметр d_3 осьового

отвору у поршні. Дослідимо його вплив на ключові характеристики системи: міцність та спроможність до точного позиціювання на великих віддальх.

Максимальне напруження в системі досягається при $z = a_2$. Відповідно до формули (2.23)

$$\max_z \sigma(z) = \sigma(a_2 - 0) = \frac{1}{A_2} (F_{\max} - \tau_3 L_3), \quad (2.37)$$

через $F_{\max}$ залежить від d_3 і не залежить від довжини L_1 .

Ілюстрація формули (2.37) показана на рисунку 2.11.

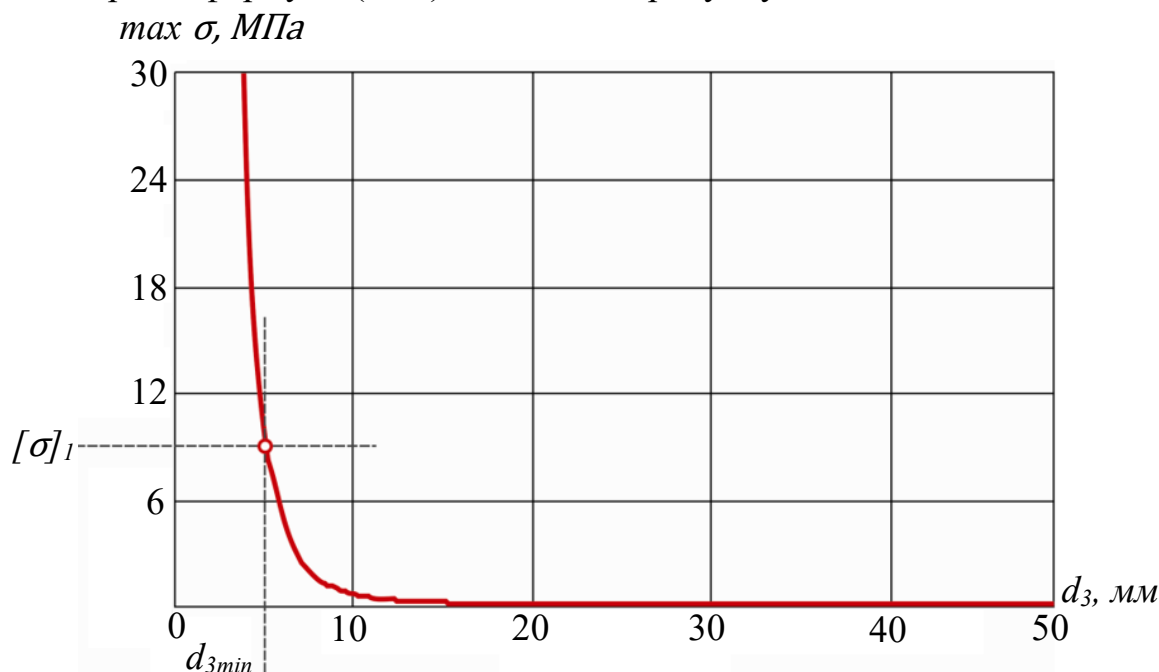


Рисунок 2.11 – Залежність максимального напруження від діаметра осьового отвору в поршні

Як видно на рисунку 2.11, максимальна рушійна сила та найбільше напруження сильно зростають за малих діаметрів осьового отвору в поршні та практично рівні нулю у разі великих діаметрів.

Умова міцності конструкції виглядає так

$$\max_z \sigma(z) \equiv \frac{1}{A_2} (F_{\max} - \tau_3 L_3) \leq [\sigma]_2, \quad (2.38)$$

де $[\sigma]_2 = \sigma_Y / n$ – допустиме напруження для матеріалу трубки (в рукаві), Па; σ_Y – границя плинності матеріалу гнучкої трубки, Па; n – коефіцієнт запасу міцності.

З умови (2.38) можна знайти мінімальний діаметр осевого отвору в поршні $d_{3\min}$, за якого гнучка трубка не розірветься. Цю величину встановлено графічно $d_{3\min} \approx 5\text{ мм}$ (див. рисунок 2.12).

Перейдемо до питань позиціювання.

Із умови

$$N(0) \geq 0, \quad (2.39)$$

знаходимо найбільшу довжину гнучкої трубки, яку можна розмотати з барабана, або найбільшу дистанцію, на яку може бути доставлена ремонтна система

$$L_1 \leq L_{\max} = \frac{F_{\max} - F_0}{\tau_1} = \frac{F_{\max} - \tau_2 L_2 - \tau_3 L_3}{\tau_1}. \quad (2.40)$$

Із умови $L_{\max} = 0$ встановлюємо максимальний діаметр осевого отвору, за якого поршень з ремонтним бандажем можуть тільки зрушити з місця. У нашому випадку $d_{3\max} \approx 21,5\text{ мм}$ (рисунок 2.12).

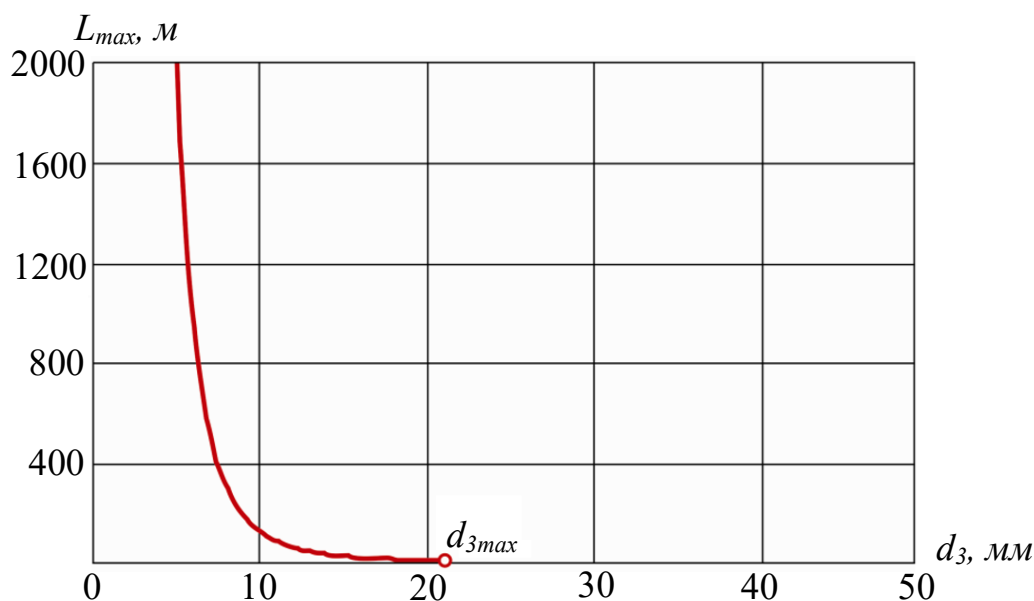


Рисунок 2.12 – Залежність максимальної віддалі доставки ремонтної системи від діаметра осевого отвору в поршні

Звернімо увагу на залишкові явища після розвантаження системи. Як показують зелені лінії на рисунку 2.8, б та 2.10, б, спостерігається деяке залишкове видовження гнучкої трубки, а найбільше – залишкове абсолютне видовження її правого кінця $z = L_1$. Знайдемо це значення, скориставшись формулою (2.34)

$$\delta_{\text{res}} = \frac{1}{E_1 A_1} \left((F_{\text{max}} - F_1) b + \tau_1 \frac{b^2}{2} + F_1 (L_1 - b) - \tau_1 \frac{L_1^2 - b^2}{2} \right). \quad (2.41)$$

Ураховуючи міркування (2.36), (2.37), перетворимо цей вираз до вигляду

$$\delta_{\text{res}} = \begin{cases} \frac{1}{E_1 A_1} \left(F_1 L_1 - \tau_1 \frac{L_1^2}{2} \right), & L_1 \leq L_* \\ \frac{1}{E_1 A_1} \left(F_{\text{max}} b + F_1 (L_1 - 2b) - \tau_1 \frac{L_1^2 - 2b^2}{2} \right), & L_1 \leq L_* \end{cases}. \quad (2.42)$$

Через залежності F_{max} і L_* від d_3 , а F_1 та b від d_3 й L_1 (2.41) маємо складну функцію від двох параметрів $\delta_{\text{res}}(d_3, L_1)$. Поведінку цієї функції можна відслідкувати за результатами розрахунків, поданих на рисунку 2.13.

Накладемо обмеження на залишкове видовження

$$\delta_{\text{res}}(d_3, L_1) \leq [\delta], \quad (2.43)$$

де $[\delta] = 0,1L_2$ – допустиме видовження, яке гарантує похибку позиціювання не більшу, ніж 10 % від довжини ремонтного бандажа. У нашому випадку $[\delta] = 0,016\text{м}$.

Аналіз графіків (рисунок 2.13), засвідчує, що існує область зміни параметрів, де нерівність (2.43) виконується. Це область довжин $L_1 < 70\text{м}$ для усіх допустимих діаметрів та область довжин $80\text{м} < L_1 < 100\text{м}$ для осьових отворів в поршні з діаметром $0,010\text{м} < L_1 < 0,011\text{м}$. За цією областю довжина трубки L_1 потребує істотного коригування (укорочення на величину δ_{res} , значну для малих d_3 та великих L_1).

Отож, стратегія раціонального конструювання полягає у тому, щоб доставляти ремонтну систему на дистанції порядку 100 м з діаметром осьового отвору в поршні 10–10,5 мм. Такий підхід забезпечить прохідність поршня принаймні у прямолінійній трубі, цілісність трубки та достатньо точне позиціювання ремонтного бандажа.

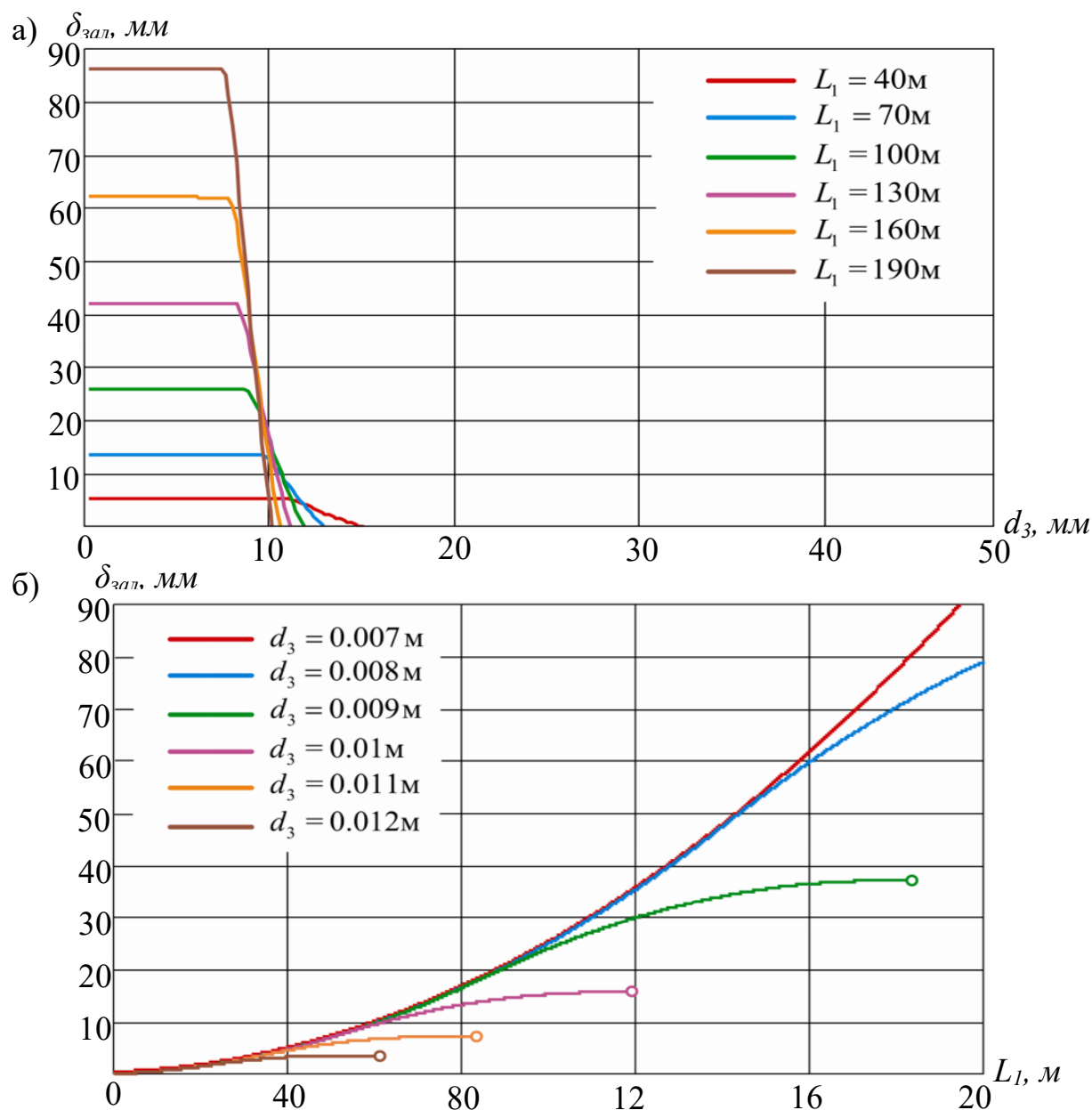


Рисунок 2.13 – Залежності найбільшого залишкового видовження гнучкої трубки від діаметра осьового отвору в поршні (а) та її довжини (б); маркерами відзначено точки з абсцисами $L_1 = L_{max}$

2.5 Чисельна модель процесу доставки поршнем ремонтної системи до важкодоступного місця дефекту трубопроводу

Для комплексного аналізу процесу доставки ремонтної системи трубопроводом газорозподільної чи теплової мережі до місця локального дефекту спричиненого корозійними процесами за допомогою поршня з осьовим отвором

доцільним є застосування чисельного моделювання на основі методу обчислювальної гідродинаміки (CFD) з використанням газодинамічних моделей і виконанням газодинамічного розрахунку шляхом розв'язання системи рівнянь газової динаміки. CFD-моделі забезпечують просторову візуалізацію та можливість кількісної оцінки тривимірного розподілу тиску, швидкості як у перед- та запоршневому просторі, так і в зоні осьового отвору в поршні. CFD-моделювання дає змогу дослідити вплив прикріпленої до поршня ремонтної системи, діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску на ньому, інтенсивність перетікання робочого середовища крізь поршень. Зміна діаметра отвору змінює співвідношення між витратами робочого середовища через наскрізний отвір і тиском, який створюється за поршнем, що суттєво впливає на його динаміку руху, стабільність руху та ризик застрягання. Крім того, CFD дозволяє моделювати процеси, які відбуваються під час руху поршня крутовигнутими відводами трубопроводу. Таким чином, CFD-моделювання є потужним інструментом для оптимізації конструкції поршнів і прогнозування динаміки протягування ними ремонтної системи трубопроводами.

2.5.1 Математична модель

CFD-моделювання руху потоку повітря під час протягування ремонтної системи трубопроводом поршнем з осьовим отвором виконано на основі чисельного газодинамічного розрахунку шляхом розв'язання системи фундаментальних рівнянь газової динаміки, які описують збереження імпульсу та маси в потоці. Основу газодинамічної моделі складає рівняння Нав'є-Стокса (2.44), яке у диференціальній формі відображає закон збереження імпульсу, враховує дію в'язких сил, тиску та зовнішніх полів (зокрема гравітаційного)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (2.44)$$

де x_i, x_j – координати; t – час; u_i, u_j – компоненти швидкості; ρ – густина газу; μ – молекулярна динамічна в'язкість газу; f_i – доданок, який враховує дію масових сил; p – тиск.

Додатково розв'язується рівняння неперервності потоку (2.45), яке математично формалізує закон збереження маси та забезпечує узгодженість розподілу швидкостей у просторі

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0, \quad (2.45)$$

де $\bar{u}_i$ – усереднені за часом значення швидкостей; $\bar{u}_i'$ – складові пульсації швидкості. [18, 94-96].

Використання наведеної газодинамічної моделі забезпечує можливість отримання детальних тривимірних полів розподілу тиску, швидкості в об'ємі трубопроводу під час протягування поршнем ремонтної системи.

Для замикання такої системи рівнянь газової динаміки, що описують турбулентний рух робочого середовища під час доставки поршнем ремонтної системи до місця локального дефекту трубопроводу, у даному дослідженні застосовано двопараметричну k - ε модель турбулентності. Ця модель є однією з найбільш поширених у практиці інженерних CFD газодинамічних розрахунків завдяки поєднанню відносної простоти реалізації та достатньої точності у прогнозуванні характеристик турбулентних потоків у каналах складної геометрії. Модель ґрунтується на введенні двох додаткових транспортних змінних. k , яка є турбулентною кінетичною енергією, що характеризує інтенсивність турбулентних пульсацій у потоці. Та ε , яка є швидкістю дисипації турбулентної кінетичної енергії, що визначає швидкість перетворення енергії пульсацій у теплоту внаслідок в'язких втрат. Для газодинамічного розрахунку цих параметрів розв'язуються два додаткові транспортні рівняння:

– рівняння збереження турбулентної кінетичної енергії k , яке описує генерацію, конвекцію, дифузію та дисипацію турбулентності

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon; \quad (2.46)$$

– рівняння збереження швидкості дисипації ε , яке визначає просторово-часовий розподіл швидкості згасання турбулентних пульсацій

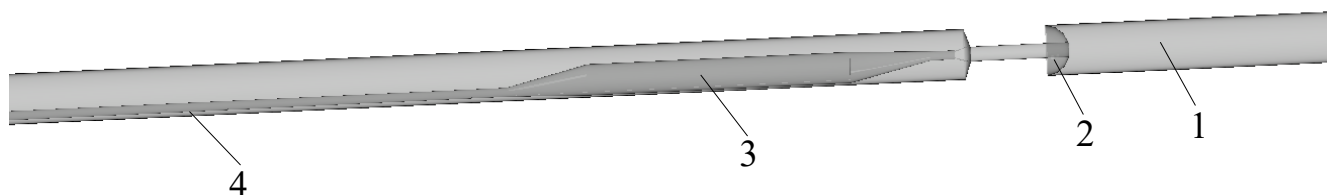
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.47)$$

де u – швидкість газового потоку; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість газу; σ_k – коефіцієнт, який рівний одиниці; G – генерація турбулентної кінетичної енергії, яка зумовлена градієнтом середньої швидкості; σ_ε – коефіцієнт, який рівний $\sigma_\varepsilon=1,3$; C_1 – коефіцієнт, який рівний $C_1=1,44$; C_2 – коефіцієнт, який рівний $C_2=1,92$. [18, 97]

2.5.2 Геометричне 3D моделювання

Для чисельного газодинамічного розрахунку наведених рівнянь газової динаміки та газодинамічного моделювання процесів, що виникають у момент, коли поршень з осьовим отвором загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу, коли можливий розрив гнучкої трубки до якої він прикріплений, побудовано тривимірну розрахункову геометричну модель (рисунок 2.14). Трубопровід 1 змодельовано у вигляді прямолінійного відрізка круглого поперечного перерізу внутрішнім діаметром 49 мм. Поршень 2 змодельовано як суцільнолитий циліндр з заокругленим переднім і вгнути заднім торцем. Довжина поршня складає 60 мм, а діаметр рівний внутрішньому діаметру трубопроводу, що забезпечує його контакт із внутрішньою поверхнею труби. Щоб дослідити вплив діаметра осьового отвору поршня на газодинамічні характеристики процесу побудовано три розрахункові геометричні моделі поршня з різними діаметрами осьового отвору (6 мм, 10 мм та 14 мм), що забезпечує можливість параметричного порівняння газодинамічних характеристик. Такі геометричні розміри

трубопроводу (внутрішній діаметр) та поршня (довжина, діаметр, діаметр осьового отвору) відповідають дослідним зразкам, що застосовувалися під час експериментальних досліджень та промислової апробації.



1 – трубопровід; 2 – поршень з осьовим отвором; 3 – ремонтна система; 4 – гнучка трубка

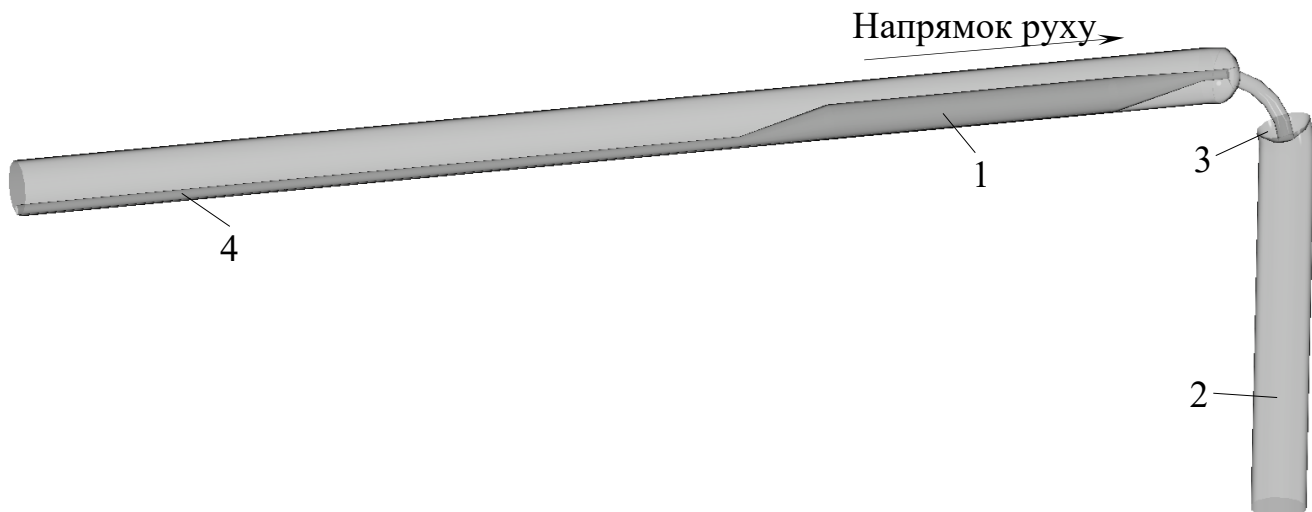
Рисунок 2.14 – Розрахункова геометрична модель поршня з осьовим отвором у прямолінійній ділянці трубопроводу

Ремонтна система 3 в розрахунковій моделі представлена як циліндр, який доставлений до місця локального дефекту трубопроводу 1 поршнем з осьовим отвором 2 (рисунок 2.14). Довжина ремонтної системи 160 мм, а діаметр 35 мм, що забезпечує гарантований зазор між зовнішньою поверхнею ремонтної системи та внутрішньою стінкою трубопроводу для мінімізації гідравлічного опору під час протягування. До двох торців циліндра приєднано конусоподібні перехідні елементи. До одного з таких елементів приєднано поршень, а до другого гнучку трубку зовнішнім діаметром 9 мм та товщиною стінки 1,5 мм.

Щоб дослідити газодинамічні процеси, які відбуваються коли поршень знаходиться у крутовигнутому відводі, в якому під час протягування ремонтної системи він пригальмовує, побудовано тривимірну геометричну модель (рисунок 2.15). Модель складається з прямолінійної ділянки трубопроводу до якої прилеглий крутовигнутий відвід. Геометричні параметри відводу подані в таблиці 2.2. У крутовигнутому відводі знаходиться поршень, який протягує ремонтну систему.

Таблиця 2.2 – Геометричні параметри відводу

Зовнішній діаметр, мм	Товщина стінки, мм	Кут вигину, °	Радіус вигину, мм
57	4	90	75



1 – ремонтна система; 2 – трубопровід; 3 – поршень з осьовим отвором; 4 – гнучка трубка

Рисунок 2.15 – Розрахункова геометрична модель поршня з осьовим отвором у крутовигнутому відводі трубопроводу

2.5.3 Формування об'ємної розрахункової сітки та задання граничних умов

Для побудови обчислювальної області сформовано тривимірну об'ємну розрахункову сітку (рисунок 2.16). У сітці переважають елементи тетраедричної форми, що забезпечує відтворення складних контурів та криволінійних поверхонь. У місці ремонтної системи та байпасного поршня виконано локальне згущення сітки для підвищення точності розрахунків у областях, де спостерігаються різкі зміни швидкості та тиску. Розмір елементів у цих зонах зменшено від 5 мм до 1 мм. Для опису приграничних ефектів сформовано пристінковий інфляційний шар з висотою елемента 1 мм та п'ятьма шарами. Така сітка дозволила забезпечити високу точність газодинамічної моделі при не великому часі розрахунку. У разі зменшення розміру елементів розрахункової сітки результати відрізнялися не більше ніж 2 %. При цьому час розрахунку суттєво збільшувався.

$$\begin{array}{l} \text{вхід} \\ M_{\text{вх}} = 0,009 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \end{array}$$

$$D_{\text{вх}} = 49 \text{ мм}$$

$$T_{\text{вх}} = 293 \text{ К}$$

$$\text{вихід}$$

$$P_{\text{вих}} = 0$$

$$D_{\text{вих}} = 49 \text{ мм}$$

$$T_{\text{вих}} = 293 \text{ К}$$



Рисунок 2.16 – Розрахункова об'ємна сітка

Як робоче середовище, рух якого моделювався в об'ємі трубопроводу, прийнято повітря, розглянуте як стискуване газове середовище. Матеріал стінок трубопроводу та відводу задано сталь із значенням еквівалентної шорсткості поверхні 0,2 мм, що відповідає трубопроводам із тривалим строком експлуатації. [16]

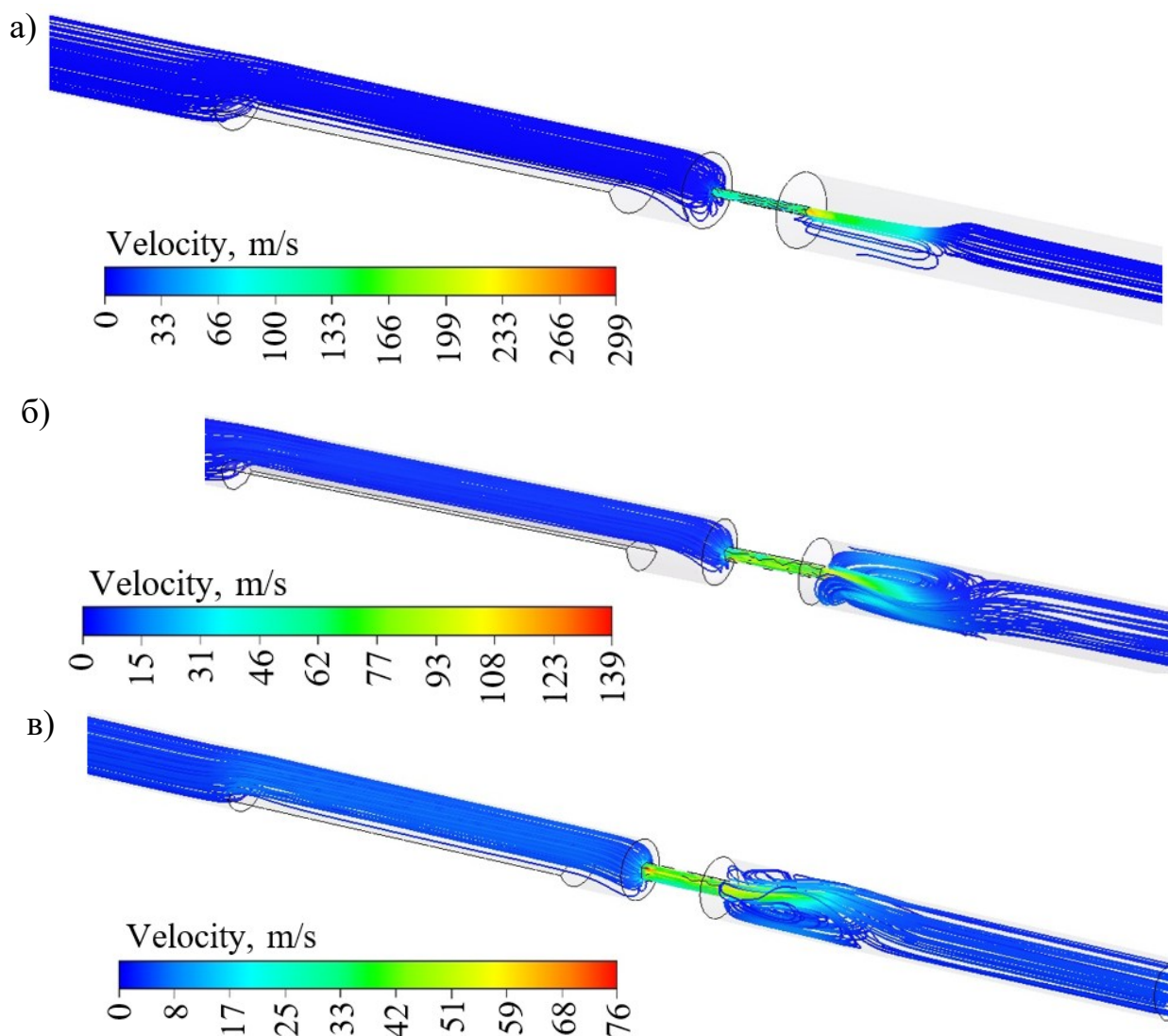
На вході задавалася масова витрата повітря 0,009 кг/с, а на виході умова, що він є вільним із атмосферним тиском. На вході потік повітря моделювався із типовим для трубопровідних систем турбулентним профілем розподілу швидкостей. Крім задання масової витрати, на вході додатково встановлювалася інтенсивність турбулентності 5 % та температура робочого середовища 293 К. Параметри потоку є наближені до експериментальних умов.

2.5.4 Результати чисельного моделювання

2.5.4.1 Поршень загальмував, одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу

Результати чисельного газодинамічного розрахунку рівнянь газової динаміки дали змогу описати процеси, що виникають у момент, коли поршень з осьовим отвором загальмував, одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу, детально проаналізувати структуру повітряного потоку і зібрати вичерпні дані про нього. Візуалізація результатів виконана побудовою тривимірних ліній течій (рисунок 2.17), забарвлених у кольори, що відповідають величинам швидкості

поток, та полів розподілу тиску в повздовжньому перерізі (рисунок 2.18) геометричної моделі (рисунок 2.14). Зазначені результати отримано для різних діаметрів осьового отвору в поршні (6 мм, 10 мм та 14 мм).



а) – діаметр осьового отвору в поршні 6 мм; б) – діаметр осьового отвору в поршні 10 мм; в) – діаметр осьового отвору в поршні 14 мм;

Рисунок 2.17 – Тривимірні лінії течій в трубопроводі у момент, коли поршень з осьовим отвором загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу

За результатами моделювання встановлено, що максимальне значення швидкості повітряного потоку спостерігаються в осьовому отворі поршня (рисунок 2.17). Для варіанта з діаметром осьового отвору 6 мм швидкість досягає значення біля 299 м/с, для діаметра 10 мм – близько 139 м/с, а для діаметра 14 мм –

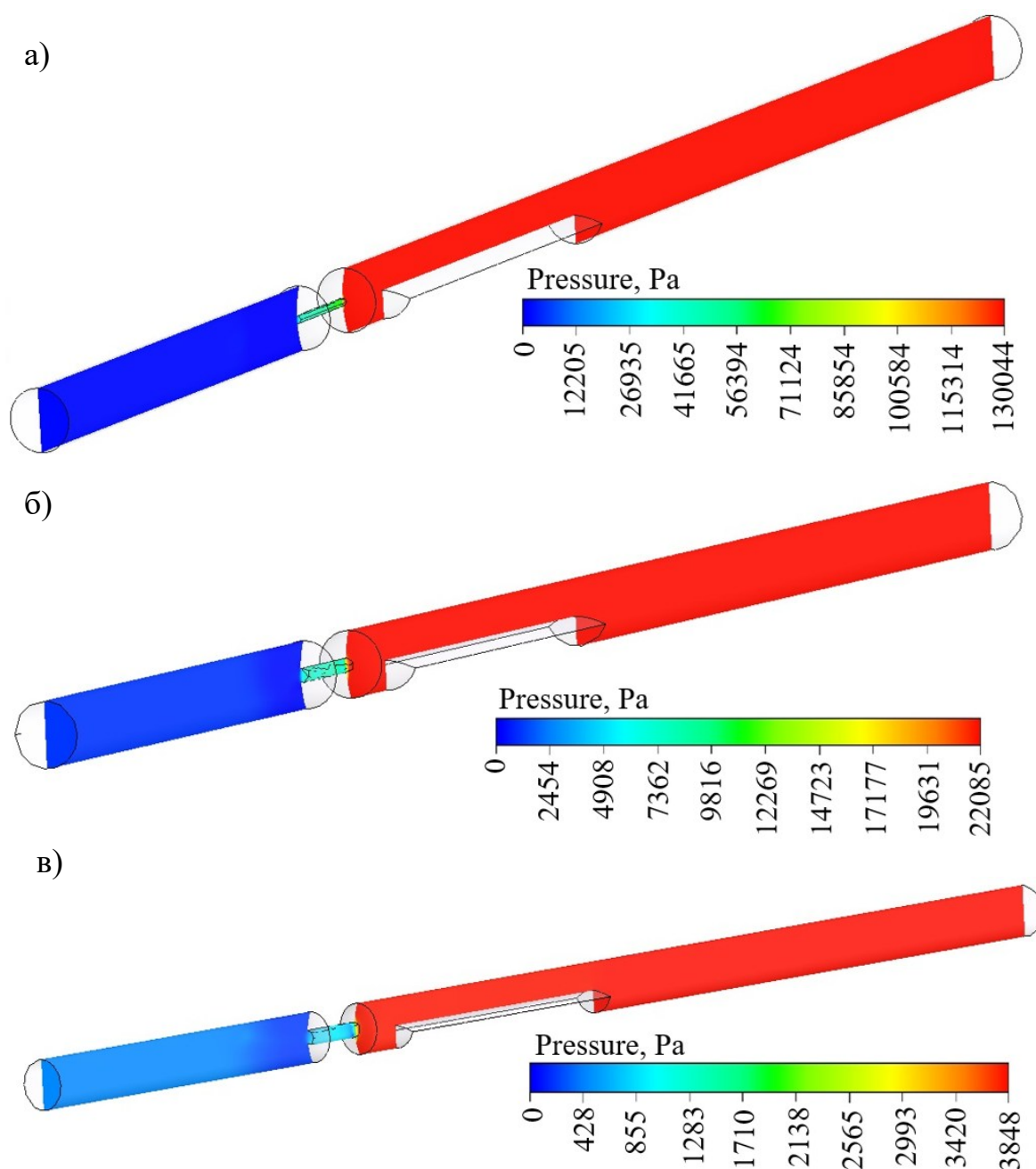


Рисунок 2.18 – Розподілу тиску в повздовжньому перерізі трубопроводу у момент, коли поршень з осьовим отвором загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки трубопроводу

орієнтовно 69 м/с. Такі максимальні значення швидкості повітряного потоку спостерігаються не тільки в зоні осьового отвору поршня, але і на ділянці виходу потоку з цього отвору на протязі, співрозмірному з довжиною поршня. Потік

максимальної швидкості в цій області має циліндричну форму з діаметром, який відповідає діаметру осьового отвору поршня, а в навколишній зоні відбувається закручування повітряних потоків малої швидкості, що формують вихрову зону. Відбувається зростання інтенсивності турбулізації потоку в навколишній зоні зі зменшенням діаметра осьового отвору поршня, що пов'язано з збільшенням швидкості течії в ньому. За межами циліндричної області відбувається різке зниження швидкості потоку з подальшим його вирівнюванням всією площею поперечного перерізу трубопроводу. У місці розташування ремонтної системи відбувається незначне прискорення повітряного потоку на декілька метрів за секунду, що обумовлено зменшенням площі поперечного прохідного перерізу.

Аналіз полів розподілу тиску (рисунок 2.18) показує, що в запоршневому просторі формується зона високого надлишкового тиску, величина якого практично відповідає вхідному значенню і є 22085 Па. Під час проходження повітряного потоку осьовим отвором поршня відбувається різке зменшення тиску, до близько 4700 Па, при цьому в отворі тиск розподілений рівномірно. Невелике значення надлишкового тиску в осьовому отворі поршня не створює значних радіальних сил, здатних викликати його притискання до внутрішньої поверхні стінки трубопроводу, що, у свою чергу, не чинить суттєвого впливу на величину сили тертя і динаміку руху поршня трубопроводом. Після виходу потоку з осьового отвору поршня відбувається подальше зменшення надлишкового тиску до наближеного до нульового значення у порожнині трубопроводу за поршнем.

Результати чисельного моделювання показують закономірність зростання перепаду тиску на поршні зі зменшенням діаметра його осьового отвору (таблиця 2.3). Для діаметра осьового отвору 6 мм величина перепаду тиску становить 91742 Па, для діаметра 10 мм – 22085 Па, а при діаметрі 14 мм вона зменшується до орієнтовно 3848 Па. [16]

Таблиця 2.3 – Результати чисельного моделювання перепаду тиску на поршні з осьовим отвором

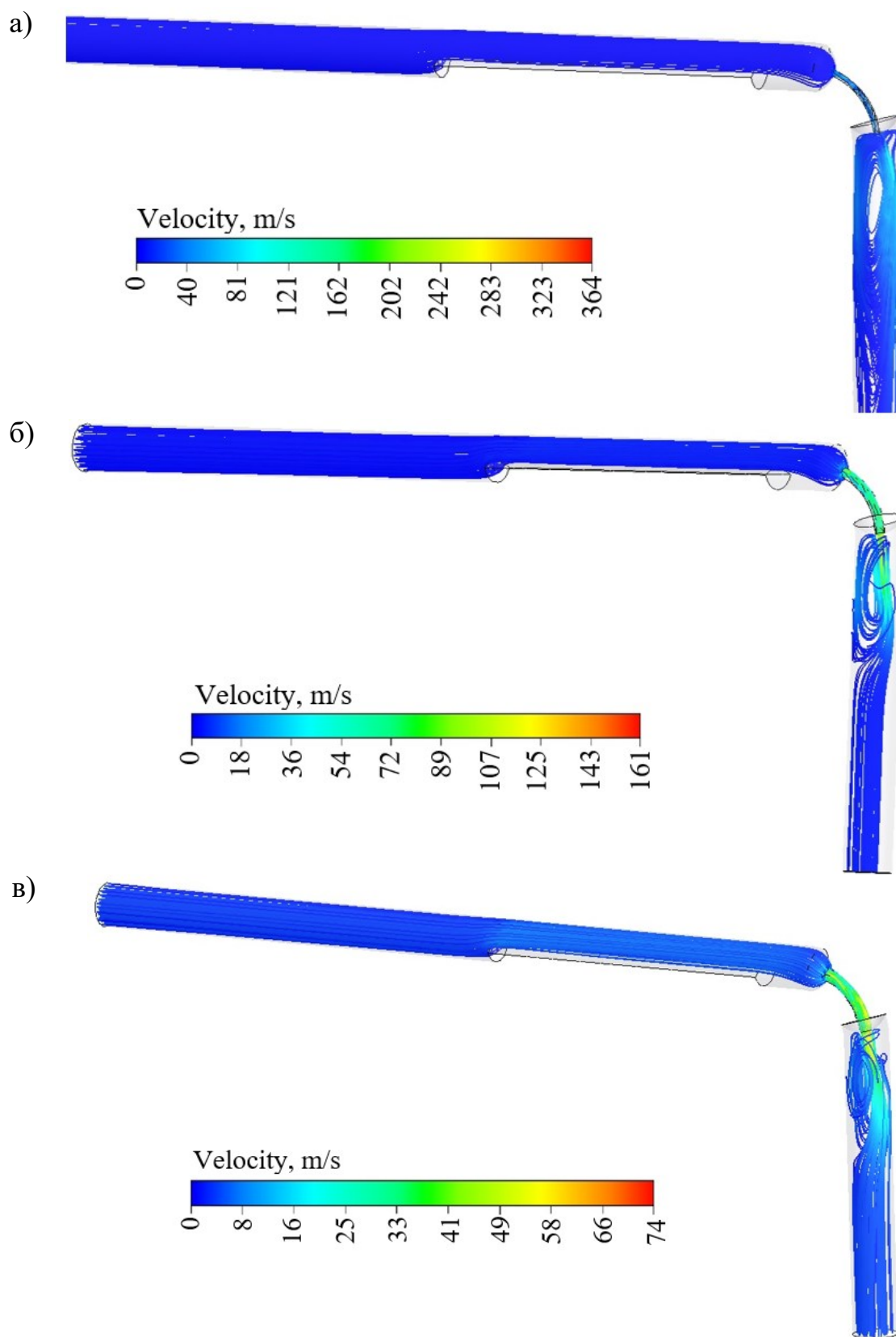
Діаметр осьового отвору в поршні, мм	Перепаду тиску на поршні, Па	
	поршень у крутовигнутому відводі	поршень зупинився одразу за місцем локального дефекту
6	140440	91742
10	34128	22085
14	4343	3848

2.5.4.2 Рух поршня крутовигнутим відводом трубопроводу

Результати чисельного моделювання газодинамічних процесів, що виникають у момент, коли поршень із осьовим отвором знаходиться у крутовигнутому відводі трубопроводу візуалізовано побудовою тривимірних ліній течій (рисунок 2.19), забарвлених у кольори, що відповідають величинам швидкості потоку, та полів розподілу тиску в повздовжньому перерізі (рисунок 2.20) геометричної моделі (рисунок 2.15). Зазначені результати отримано для різних діаметрів осьового отвору в поршні (6 мм, 10 мм та 14 мм).

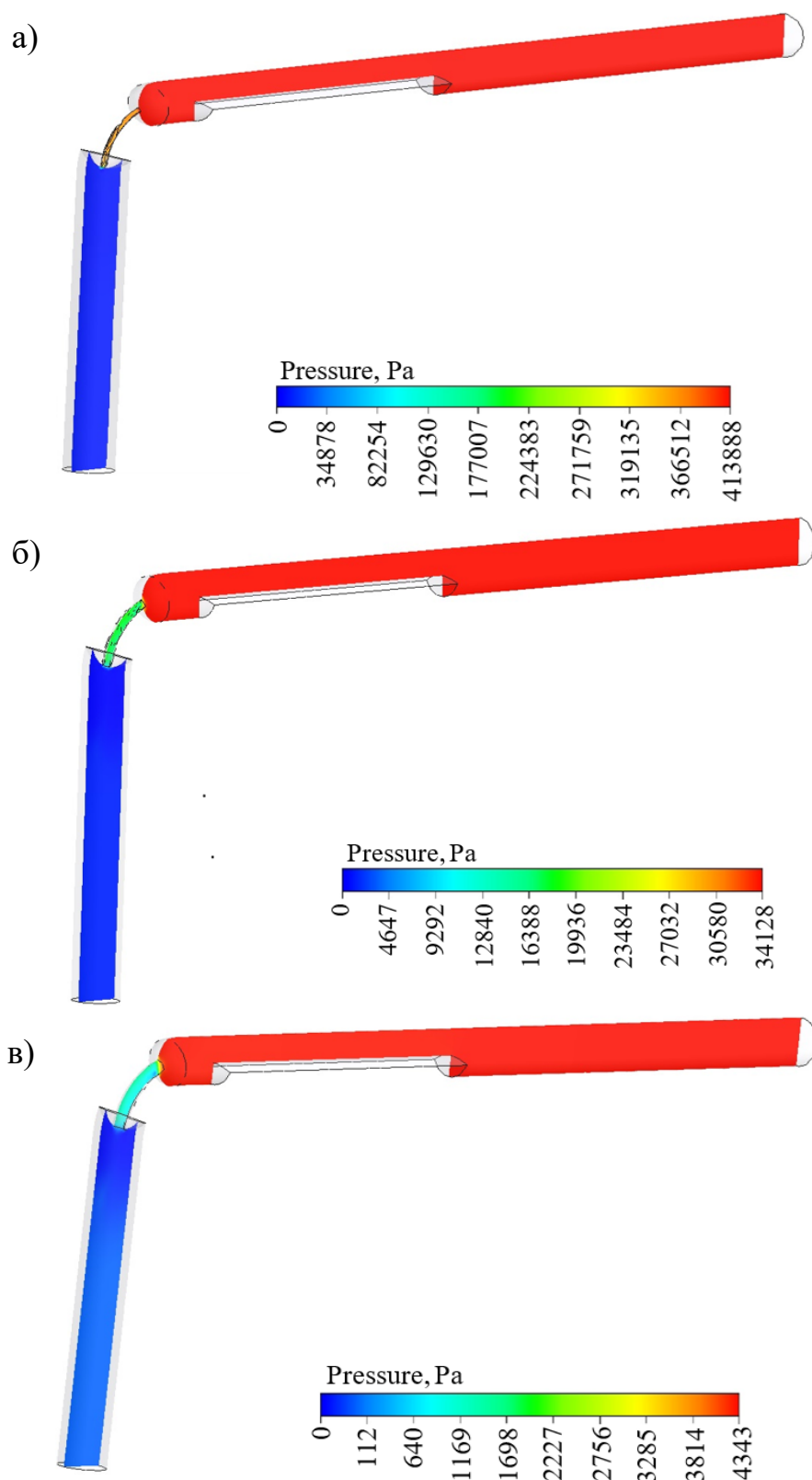
У процесі проходження поршнем, виготовленим із силіконового компаунда, крутовигнутого відводу трубопроводу відбувається його деформування і він набуває форми внутрішньої порожнини відводу. У результаті цього потік повітря проходить осьовим отвором поршня, який у деформованому стані має вигнуту форму і повторює радіус вигину відводу.

Аналіз результатів чисельного моделювання показав, що характер газодинамічних процесів, зафіксований під час знаходження поршня в крутовигнутому відводі трубопроводу (рисунок 2.19, рисунок 2.20), зберігає основні закономірності, встановлені для його перебування на прямолінійній ділянці (рисунок 2.17, рисунок 2.18). Для такого випадку максимальні значення швидкості повітряного потоку також фіксуються в зоні криволінійного



а) – діаметр осьового отвору в поршні 6 мм; б) – діаметр осьового отвору в поршні 10 мм; в) – діаметр осьового отвору в поршні 14 мм;

Рисунок 2.19 – Тривимірні лінії течій в трубопроводі у момент, коли поршень з осьовим отвором у крутовигнутому відводі трубопроводу



а) – діаметр осьового отвору в поршні 6 мм; б) – діаметр осьового отвору в поршні 10 мм; в) – діаметр осьового отвору в поршні 14 мм;

Рисунок 2.20 – Розподілу тиску в повздовжньому перерізі трубопроводу у момент, коли поршень з осьовим отвором, у крутовигнутому відводі трубопроводу

центрального осьового отвору поршня та на циліндричній ділянці виходу потоку з нього, довжина якої є співрозмірною з довжиною поршня (рисунок 2.19). Під час руху поршня крутовигнутим відводом максимальна швидкість потоку в центральному отворі є більшою, ніж коли поршень рухається прямолінійною ділянкою, що пояснюється впливом геометрії відводу і викривленням осьового отвору поршня. Так, для центрального осьового отвору діаметром 6 мм максимальна швидкість повітряного потоку становить близько 364 м/с, при діаметрі 10 мм – орієнтовно 161 м/с, а при діаметрі 14 мм – 74 м/с. Також відмінною особливістю є те, що за межами осьового отвору поршня циліндрична ділянка максимальної швидкості виявляється зміщеною від осі трубопроводу у напрямку твірної труби з опуклого боку відводу, що зумовлено впливом криволінійної траєкторії каналу на розподіл швидкісного поля.

Аналіз полів розподілу тиску при руху поршня крутовигнутим відводом трубопроводу (рисунок 2.20) свідчить, що їх просторовий характер повторює закономірності, визначені для випадку його перебування на прямолінійній ділянці трубопроводу (рисунок 2.18). У запоршневому просторі формується зона високого надлишкового тиску (рисунок 2.20), величина якого рівна 34128 Па. При проходженні повітряного потоку крізь осьовий отвір поршня спостерігається різке зниження надлишкового тиску. Після виходу потоку з осьового отвору поршня тиск у порожнині трубопроводу за поршнем досягає значень, наближених до нуля. Результати газодинамічних розрахунків підтверджують, що коли поршень в крутовигнутому відводі перепад тиску на ньому є більшим, ніж на прямолінійній (таблиця 2.3). Для діаметра осьового отвору 6 мм він складає 140044 Па, для 10 мм – 34128 Па, а для 14 мм – 4343 Па. Це зростання пояснюється збільшенням локальних втрат тиску через зміну напрямку потоку та інтенсифікацію турбулентних процесів перед поршнем. Оскільки перепад тиску безпосередньо визначає величину рушійної сили, що діє на поршень, його збільшення підвищує здатність поршня долати крутовигнуті відводи та протягувати ремонтну систему трубопроводом. [16]

2.6 Оцінювання міцності дефектного трубопроводу підсиленого внутрішньотрубно встановленим бандажем

На етапі розробки технологій ремонту тонкостінних конструктивних елементів з використанням латок та різних видів композитних матеріалів виникає питання оцінки міцності відновленої деградованої конструкції та доцільності такого ремонту. Особливий теоретичний та практичний інтерес має побудова простих та ефективних моделей для оцінки міцності пошкоджених корозійними процесами деградованих трубопроводів з покриттями. У праці [98] було запроваджено модель тріщини з шарнірно з'єднаними краями для моделювання впливу гнучкого покриття. Аналіз впливу покриттів на напружений стан та граничну рівновагу циліндричних оболонок з тріщинами проводився як числовими, так і асимптотичними методами [98-100]. Ми скористаємося цими аналітичними результатами для оцінювання ефективності технології внутрішньотрубного ремонту бандажем труби з поздовжньою тріщиною.

Розглянемо фрагмент труби радіусом R та товщиною h з поздовжньою наскрізною тріщиною завдовжки $2l$, який перебуває під внутрішнім тиском p та відремонтований внутрішнім бандажем завтовшки h_{cov} (рисунок 2.21). Припускаємо, що бандаж достатньо довгий порівняно з тріщиною, щоб його довжина не впливала на розподіл напружень поблизу дефекту. Завдання полягає в оцінці та порівнянні допустимого навантаження для бездефектної, пошкодженої та відновленої труби.

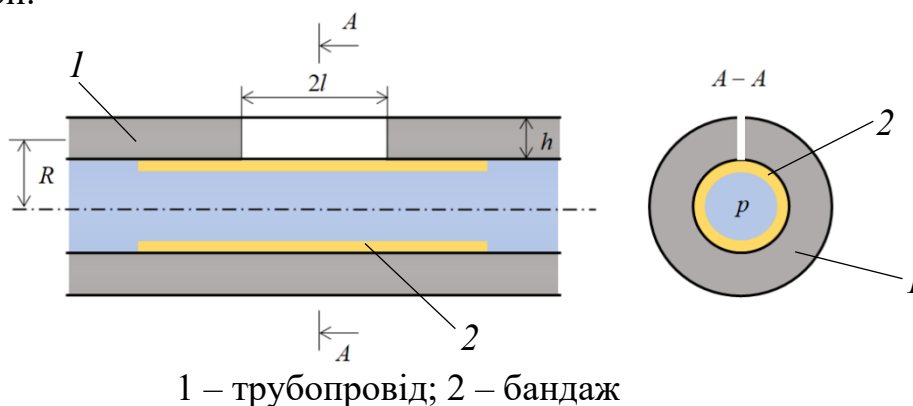


Рисунок 2.21 – Схема трубопроводу з поздовжньою тріщиною, відремонтованої внутрішньотрубним бандажем

Залежно від наявності або відсутності дефекту в трубі та етапів її відновлення використали різні розрахункові моделі для оцінки міцності трубопроводу під тиском.

Для оцінки граничного тиску труби без дефектів використовується формула Барлоу [101]

$$p_{*1} = [\sigma] \frac{h}{R}. \quad (2.48)$$

Для оцінки міцності труби з поздовжньою тріщиною без відновлення ми використовуємо асимптотичну формулу Е. Фоліаса [102]

$$p_{*2} = \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi l}} \frac{h}{R} \left(1 - \frac{5\pi}{64} \lambda^2 \right). \quad (2.49)$$

Для дослідження впливу гнучкого покриття на міцність оболонки з наскрізною тріщиною ми використовували модель розрізу з шарнірно з'єднаними краями. На основі методу малих параметрів отримано наближені асимптотичні формули для оцінки міцності циліндричної оболонки з гнучким покриттям поблизу дефекту за двома (для оболонки та для покриття) критеріями міцності [98–100]. Зокрема, для випадку, коли гнучке покриття наноситься на внутрішню поверхню циліндричної оболонки, наведені нижче вирази визначають граничний внутрішній тиск відновленої труби за критерієм тріщиностійкості її матеріалу. Це означає значення тиску, коли тріщина починає зростати

$$p_{*3} = \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi l}} \frac{h}{R} \sqrt{\frac{2(3+2\nu)}{3(1+\nu)}} \left\{ 1 - \frac{\lambda^2}{3-\nu-2\nu^2} \left[\frac{7-\nu-10\nu^2}{64} \pi - \sqrt{3(1-\nu^2)} \left(\frac{5+37\nu}{96} + \frac{1+5\nu}{16} \ln \frac{\gamma_0 \lambda}{8} \right) \right] \right\}, \quad (2.50)$$

Відповідно, наступний вираз (2.51) визначає граничний внутрішній тиск відновленої труби за критерієм міцності покриття, коли бандаж починає руйнуватися

$$p_{*4} = [\sigma]_{\text{cov}} \frac{h_{\text{cov}}}{R} \sqrt{\frac{2(3+2\nu)}{3(1+\nu)}} \left\{ 1 - \frac{\lambda^2}{3-\nu-2\nu^2} \left[(2-\nu) \frac{\pi}{16} - \frac{\nu}{48} \sqrt{\frac{3(1-\nu)}{1+\nu}} \left(\frac{1+11\nu}{3} + (1+5\nu) \ln \frac{\gamma_0 \lambda}{8} \right) \right] \right\}, \quad (2.51)$$

У формулах (2.48)–(2.51) $[\sigma]$, $[\sigma]_{\text{cov}}$ – гранична міцність на розтяг для матеріалів труби та композитної латки відповідно, Па;

K_{1c} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (тріщиностійкість матеріалу труби), Па м^{1/2};

$$\lambda^2 = \sqrt{12(1-\nu^2)} l^2 / (Rh); \quad (2.52)$$

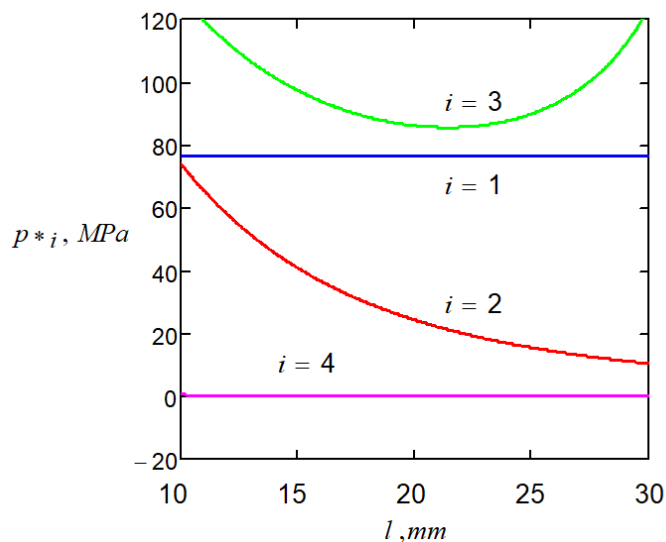
ν – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби;

$\ln \gamma_0 = 0,5772\dots$ – стала Ейлера. [19]

Таким чином, для фіксованих R, h, ν та змінної l величина λ практично є параметром довжини тріщини.

Ми провели порівняльний аналіз міцності неушкодженого, пошкодженого та відновленого трубопроводу з такими геометричними та механічними параметрами: для сталеві труби $D = 57 \cdot 10^{-3}$ м, $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R = (D - h) / 2 = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $[\sigma] = 360 \cdot 10^6$ Па, $\nu = 0.3$, $K_{1c} = 100 \cdot 10^6$ Па·м^{1/2}; для бандажної латки $h_{cov} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $[\sigma]_{cov} = 10 \cdot 10^6$ Па.

Після проведення відповідних розрахунків згідно з формулами (2.48)–(2.51) з використанням вищезазначених параметрів побудували залежності граничних значень внутрішнього тиску від пів довжини дефекту (рисунок 2.22).



1 – труба без дефектів, 2 – труба з тріщиною, 3, 4 – відновлена труба з тріщиною

Рисунок 2.22 – Залежності граничних значень внутрішнього тиску від пів довжини дефекту

Тут граничний тиск для труби без дефектів є сталим: $p_{*1} = 76.6$ МПа. Як видно з асимптотичних ліній 2 та 3, критичні тиски, розраховані за критеріями тріщиностійкості для невідремонтованих та відремонтованих труб, зменшуються зі збільшенням довжини дефекту, як і очікувалося. Однак, для довших дефектів ($l > 20$ мм) параметр λ , малий за припущенням, стає досить великим, тому асимптотичні формули втрачають свою справедливість. Це призводить до не виправданого збільшення граничного тиску, як це видно у випадку 3. Критичний тиск p_{*4} , розрахований за критерієм міцності покриття, помітно не змінюється у вибраному діапазоні довжини дефекту, а також має спадний характер, тому його мінімальне значення $p_{*4,\min} \approx 0.34$ МПа, досягається на межі справедливості результатів – $l = 20$ мм.

Порівнюючи отримані результати, бачимо, що найслабшою ланкою реставрованого трубопроводу є бандаж з найнижчими значеннями граничного тиску у всьому діапазоні зміни довжини дефекту (лінія 4 (рисунок 2.22)). Однак, навіть за мінімального значення $p_{*4,\min} \approx 0.34$ МПа, структурна цілісність забезпечується для трубопровідних мереж з робочим тиском $p \leq 0.1$ МПа. [19]

2.7 Висновки до розділу 2

1. Розроблено механіко-математичну модель для аналітичного дослідження процесу доставки ремонтного бандажу до місця локального дефекту стінки трубопроводу пружним поршнем з осьовим отвором. На основі аналітичних розв'язків задач про фрикційне проковзування кусково-однорідного стержня виконано аналіз напружено-деформованого стану системи на усіх трьох етапах процесу: руху до місця локального дефекту, зупинка в місці дефекту (компресор увімкнений) та розвантаження після вимкнення компресора.

2. Досліджено питання міцності ремонтної системи та позиціонування ремонтного бандажа. Зокрема, для трубопроводу діаметром 50 мм мінімальне допустиме значення діаметра осьового отвору у поршні, при якому зберігається

цілісність конструкції, становить 5 мм. Для практичних застосувань рекомендовано щоб діаметр осьового отвору в поршні був в межах від 10 мм до 10,5 мм. Такий розмір дозволяє доставляти ремонтний бандаж на дистанцію від 80 м до 100 м з достатньою точністю позиціювання від 15 мм до 20 мм. Системи, обладнані поршнями з меншим діаметром отвору, безумовно здатні долати значно більші дистанції, проте питання точності позиціювання при цьому стають критичними.

3. Чисельним моделюванням шляхом газодинамічного розрахунку рівнянь газової динаміки встановлено, що під час проходження повітряного потоку крізь осьовий отвір байпасного поршня відбувається різке зменшення тиску, розподіл якого всередині отвору є рівномірним. Тиск, який виникає у цій зоні не забезпечує виникнення помітних радіальних складових навантаження, здатних викликати щільне прилягання поршня до внутрішньої поверхні стінки трубопроводу, а тому не чинить істотного впливу на силу тертя та динаміку його руху трубопроводом.

4. Зменшення діаметра осьового отвору в поршні призводить до зростання перепаду тиску на ньому. Встановлена залежність є нелінійною, виражено спадною. Так, коли поршень перебуває на прямолінійній ділянці трубопроводу у разі збільшенні діаметра осьового отвору в ньому від 6 мм до 10 мм величина перепаду тиску на ньому зменшується від 91742 Па до 22085 Па, тоді як подальше збільшення діаметра осьового отвору до 14 мм зменшує перепад тиску на ньому до 3848 Па. Такі тенденції однакові як для випадків коли поршень рухається прямолінійними ділянками трубопроводу та крутовигнутими відводами, однак у відводах трубопроводів величини перепаду тиску на поршні є істотно більшими, що зумовлено додатковими локальними гідравлічними втратами та посилення турбулентності.

5. Описано аналітичні результати, які дозволяють оцінити вплив механічних та геометричних характеристик відремонтованих трубопроводів внутрішньотрубно встановленими бандажами на їх міцність під внутрішнім тиском. Розраховано значення руйнівного навантаження для бездефектної труби, для труби з поздовжньою тріщиною та для внутрішньотрубно підсиленої бандажем труби. Показано, що в мережах низького тиску цілісність ремонтної конструкції

забезпечується.

Основні результати другого розділу опубліковано в працях [16-19].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДОСТАВКИ РЕМОНТНОЇ СИСТЕМИ ПОРШНЕМ У ВАЖКОДОСТУПНЕ МІСЦЕ ТРУБОПРОВОДУ

Розроблено технологію і виготовлено поршні із осьовим отвором із силіконового компаунда на олов'яному каталізаторі та експериментальну установку для протягування ними ремонтної системи трубопроводом, який містять відвід та трубопроводом, який містить трійник. На скляних таких установках перевірено можливість доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи у важкодоступне місце трубопроводу, а на металевих встановлено закономірності зміни тиску у запоршневому просторі під час виконання таких операцій. Встановлено закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на рушійну силу, яка діє на нього для випадку коли він знаходиться у крутовигнутому відводі та зупинився одразу за місцем локального дефекту трубопроводу.

3.1 Розроблення технології виготовлення конструктивних елементів ремонтного пристосування

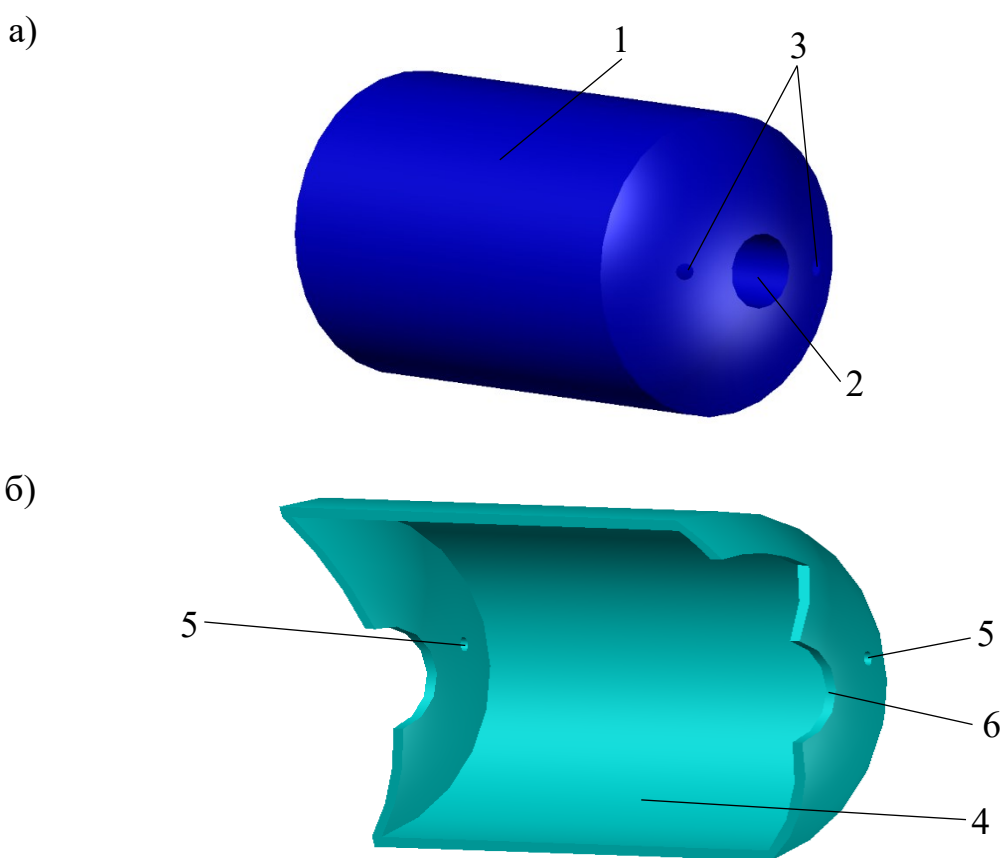
Ремонтна система, призначена для виконання лабораторних експериментів, містить ряд елементів, кожен з яких забезпечує виконання окремих технологічних операцій під час доставки та встановлення ремонтного бандажа у важкодоступну місці трубопроводу пошкодженому корозійними процесами. Така система кріпиться до поршня на який діє рушійна сила, що призводить до протягування ремонтної системи трубопроводом. Ремонтна система складається з ремонтного бандажа, який поміщений на еластичну оболонку, яка виконує роль силового компонента для притискання бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу у місці дефекту. Важливою частиною конструкції є гнучка трубка, яка забезпечує гальмування байпасного поршня у момент, коли він знаходиться безпосередньо за місцем локального дефекту стінки труби. Також нею подається повітря до

еластичної оболонки. Для того щоб виконувати експериментальні дослідження розроблено технологію виготовлення та виготовлено складові ремонтної системи і їх з'єднано в єдину систему.

Найбільш важкодоступні місця трубопроводів газових і теплових мереж із точки зору внутрішньотрубного ремонту знаходяться за фасонними елементами – трійниками, крутовигнутими відводами. Такі елементи трубопроводів здатні проходити циліндричні поршні із силіконового компаунда. Під час їх проходження такі поршні не руйнуються, малоймовірне їх застрягання [81-85]. Крім того такі поршні ефективно очищують трубопроводи [79, 103-107].

Виготовлення поршня з силіконового компаунда доцільно здійснювати методом лиття, що потребує попереднього розроблення та виготовлення спеціалізованої ливарної форми [22]. При цьому поршень повинен не тільки переміщувати ремонтну систему трубопроводом, але і бути конструктивно таким, щоб після його зупинки одразу за місцем локального дефекту стінки труби не відбулось надмірного збільшення тиску в трубопроводі і розриву гнучкої трубки, так як неможливо миттєво припинити подавання повітря компресором після зупинки поршня. Для усунення цього конструкція поршня повинна передбачати центральний наскрізний осьовий отвір, який повинен забезпечити пропускання повітря після зупинки поршня. З огляду на ці вимоги розроблено спеціальну технологію виготовлення поршнів із осьовим отвором з силіконового компаунда на олов'яному каталізаторі (поліконденсаційного). Процес передбачав повний цикл проектування, виготовлення та контроль якості. На першому етапі було сформовано 3D модель поршнів. Для цього визначено необхідну їх геометричну форму, виконано параметричні розрахунки та створено 3D модель [22] з подальшою їх перевіркою і коригуванням (рисунок 3.1, а). Такі моделі містять осьовий отвір і два отвори для кріплення до поршня тяги. На основі 3D моделей поршнів роблено 3D моделі ливарних форм, які передбачають можливість поміщення в них циліндричного осердя (для формування наскрізного отвору в поршні) та містять отвори для поміщення спиць (для формування наскрізних отворів під тяги) (рисунок 3.1, б). Також ливарні форми містять отвори для

залиття силіконового компаунда. Такі ливарні форми виготовляли 3D друком (рисунок 3.2). У ливарну форму встановлювали металеві спиці і циліндричне осердя (рисунок 3.3). Силіконовий компаунд готували шляхом змішування силікону з каталізатором у заданих пропорціях. Після цього суміш заливали в ливарні форми та витримували необхідний час для завершення процесу полімеризації. Після твердіння виконували послідовне вилучення спиць і осердя, а також акуратне розформування силіконового поршня. Завершальним етапом була перевірка якості виготовлених поршнів. Оцінювали точність геометричних параметрів, гладкість поверхонь та відсутність дефектів лиття.



а) – поршень із осьовим отвором; б) – ливарна форма

1 – поршень із осьовим отвором; 2 – осьовий отвір; 3 – отвори для тяг; 4 – ливарна форма; 5 – отвори для спиць; 6 – отвір для осердя

Рисунок 3.1 – 3D модель байпасного поршня та ливарної форми

На рисунку 3.4 подано виготовлені зразки поршнів із осьовим отвором, сформованих методом лиття силіконового компаунда твердістю на олов'яно-

поліконденсаційному каталізаторі у спеціально розроблені та виготовлені ливарні форми. Поршні мають різний діаметр осевого отвору (6 мм, 10 мм та 14 мм) та два отвори малого діаметра для пропускання сталевго дроту, що забезпечує можливість кріплення до них ремонтної системи. Діаметр поршня був рівний внутрішньому діаметру труб і фасонних елементів експериментальних установок. Довжина поршнів складала 60 мм. [16]

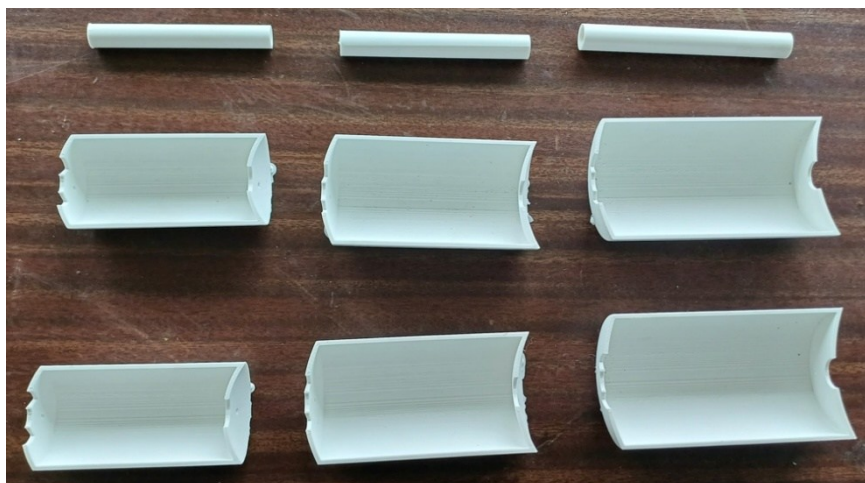
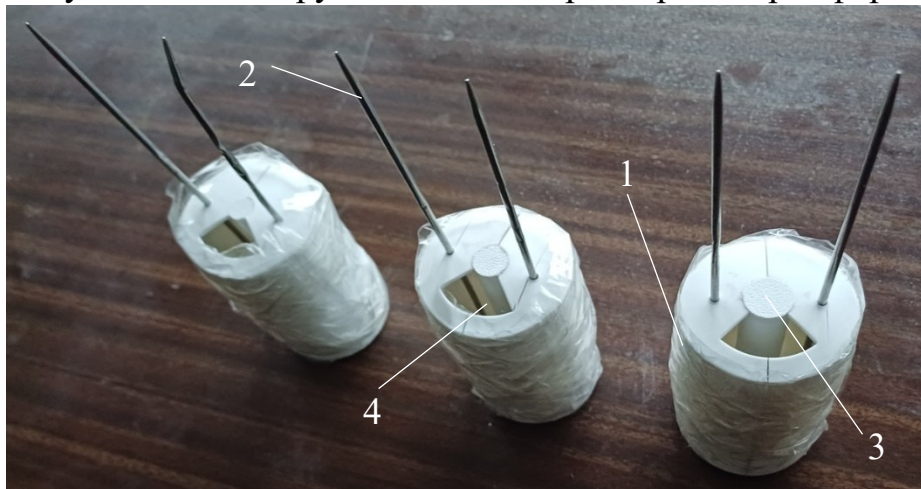


Рисунок 3.2 – Надруковані на 3D принтері ливарні форми



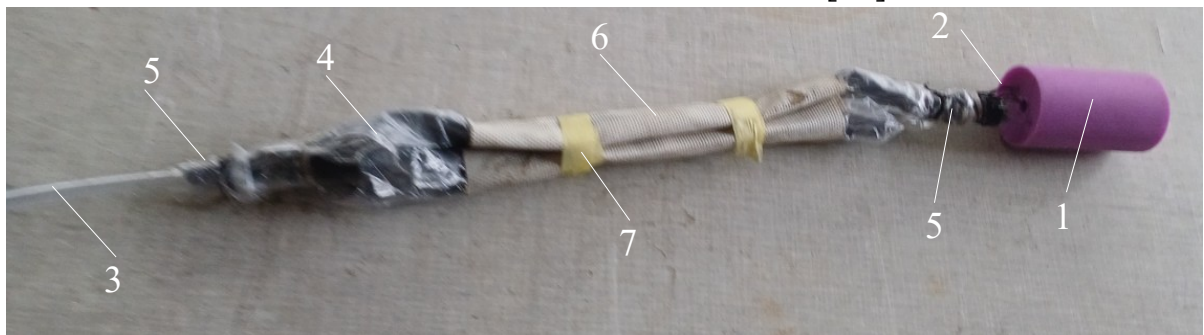
1 – ливарна форма; 2 – спиця; 3 – осердя; 4 – заливна горловина

Рисунок 3.3 – Ливарні форми, готові до заливання силіконового компаунда



Рисунок 3.4 – Виготовлені поршні із осевим отвором з силіконового компаунда

До поршня 1 з осьовим отвором сталевим дротом 2 прикріплено гнучку полівінілхлоридну трубку 3 (рисунок 3.5). На вільному кінці гнучкої трубки змонтовано ремонтну систему, що складається з еластичної оболонки, закріпленої на трубці за допомогою зав'язок для забезпечення герметичності. У місці розміщення еластичної оболонки в стінці гнучкої трубки виконано наскрізні отвори, що забезпечує вихід повітря в еластичну оболонку під час монтажу ремонтної системи. Зверху еластичної оболонки розташована поліетиленова плівка 4, яка додатково фіксується зав'язками 5 до трубки 3. На поліетиленову плівку 4 встановлено ремонтний бандаж 6 довжиною 110 мм, який попередньо просякнутий спеціальною епоксидною смолою, та тимчасово закріплений до еластичної оболонки тонкою неміцною стрічкою 7, що утримує його у необхідному положенні до моменту встановлення в трубопроводі. Прилипанню ремонтного бандажа 6 до еластичної оболонки запобігає поліетиленова плівка 4. [16]



1 –поршень з осьовим отвором; 2 – сталевий дріт; 3 – гнучка полівінілхлоридна трубка; 4 – поліетиленова плівка; 5 – зав'язка; 6 – ремонтний бандаж; 7 – стрічка
Рисунок 3.5 – Підготовлена до експериментальних досліджень ремонтна система з поршнем із осьовим отвором

3.2 Розроблення та монтаж експериментальних установок

3.2.1 Експериментальні установки з крутовигнутим відводом

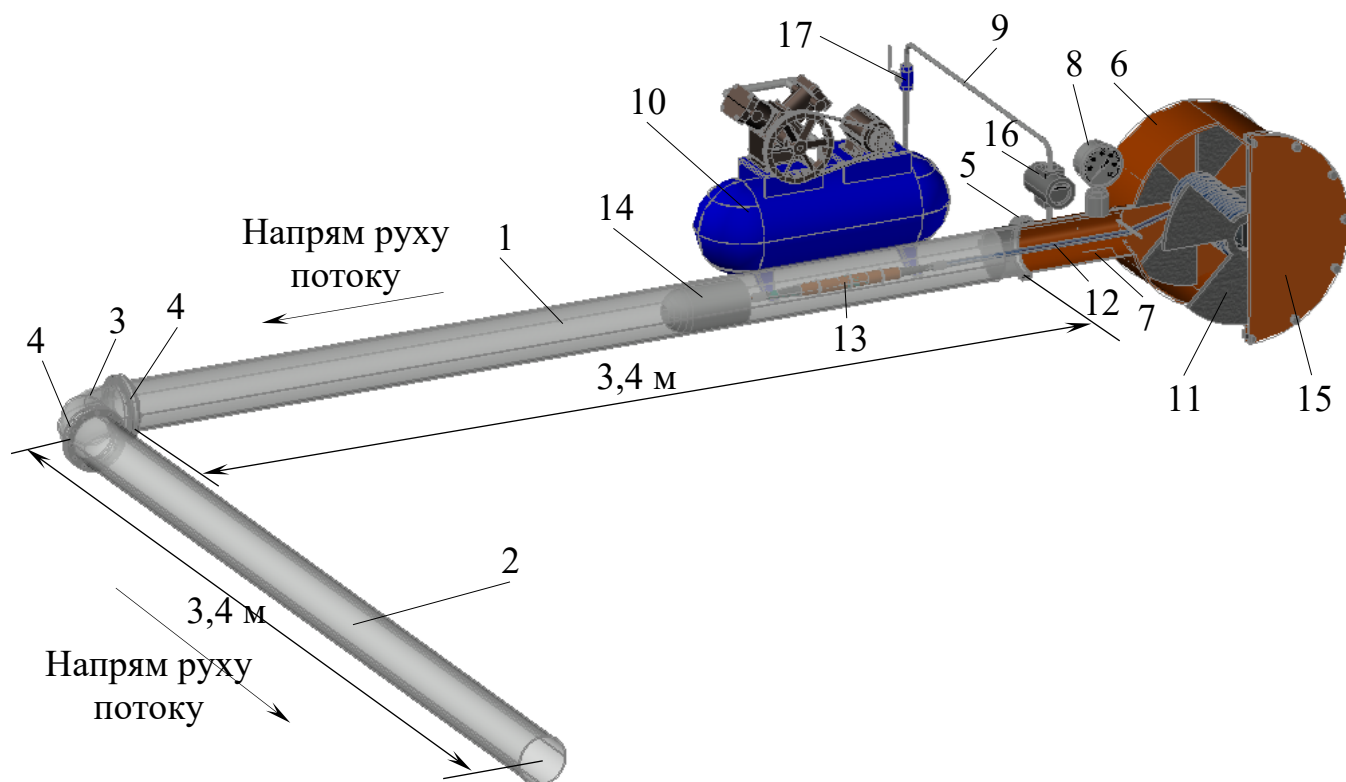
Для перевіряння можливості реалізації ідеї протягування поршнем із осьовим отвором з гіперпружного матеріалу (силіконового компаунда) ремонтної системи відводом трубопроводу розроблено та змонтовану лабораторну експериментальну

установку з скляних труб та скляного відводу. Виконання лабораторної експериментальної установки з скла забезпечує можливість візуально спостереження за динамікою протягування поршнем ремонтної системи крутовигнутим відводом трубопроводу. Основними елементами лабораторної установок є дві скляні труби 1 і 2, кожна з яких має внутрішній діаметр 55 мм та довжину 3,4 м (рисунок 3.6). Вони з'єднані між собою скляним крутовигнутим відводом 3 з аналогічним внутрішнім діаметром 55 мм, вигнутим під кутом 90° з радіусом вигину, що дорівнює $1,5DN$, де DN — умовний діаметр трубопроводу (рисунок 3.7). Труби 1, 2 і крутовигнутий відвід 3 з'єднані між собою ущільненими гумовими прокладками фланцями 4, виготовлених методом 3D-друку. До одного з торців скляної труби 1 за допомогою металевого фланця 5 приєднано герметичну циліндричну камеру 6, у якій розміщено барабан 11 із попередньо намотаною гнучкою трубкою 12. Камера 6 оснащена патрубком із трубною котушкою 7, до якої підключають манометр 8 для контролю тиску, а також шланг 9, що з'єднаний із компресором 10. Повітряна подача до системи регулюється за допомогою крана 17, встановленого на виході компресора 10.

На початку експерименту поршень 14, до якого приєднано передній кінець гнучкої трубки 12 з розміщеною на ній ремонтною системою 13 проштовхують через трубну котушку 7 герметичної циліндричної камери 6 і запасовують у трубу 1. Після чого трубну котушку 7 фланцем 5 приєднують до торця скляної труби 1 і розміщують у середині камери 6 барабан 11 із намотаною гнучкою трубкою 12. Тоді для забезпечення герметичності камери 6 монтують кришку 15. Таким чином, коли здійснити подачу повітря компресором 10, поршень 14 почне рух скляним трубопроводом, протягуючи за собою ремонтну систему 13 крізь труби 1, 2 і скляний крутовигнутий відвід 3.

Для фіксації динаміки протягування поршнем ремонтної системи скляним трубопроводом із відводом організовано відеоспостереження. Завдяки прозорим скляним трубам і відводу була можливість візуально контролювати рух поршня в реальному часі та здійснювати відеозапис з високою частотою кадрів. Камера фіксувала не тільки швидкість переміщення поршня, а і його взаємодію зі стінками

труби та відводу, деформації, перетікання повітря, зміщення ремонтного елемента тощо. Отримані відеоматеріали дозволили виконати детальний якісний і кількісний аналіз траєкторії руху. [16]



1, 2 – скляна труба; 3 – скляний крутовигнутий відвід; 4, 5 – фланець;
 6 – герметична камера; 7 – трубна котушка; 8 – манометр; 9 – шланг;
 10 – компресор; 11 – барабан; 12 – гнучка трубка; 13 – ремонтна система;
 14 – поршень із осьовим отвором; 15 – кришка; 16 – газовий лічильник; 17 – кран
 Рисунок 3.6 – Схема експериментальної установки для дослідження динаміки
 протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом,
 який містить крутовигнутий відвід

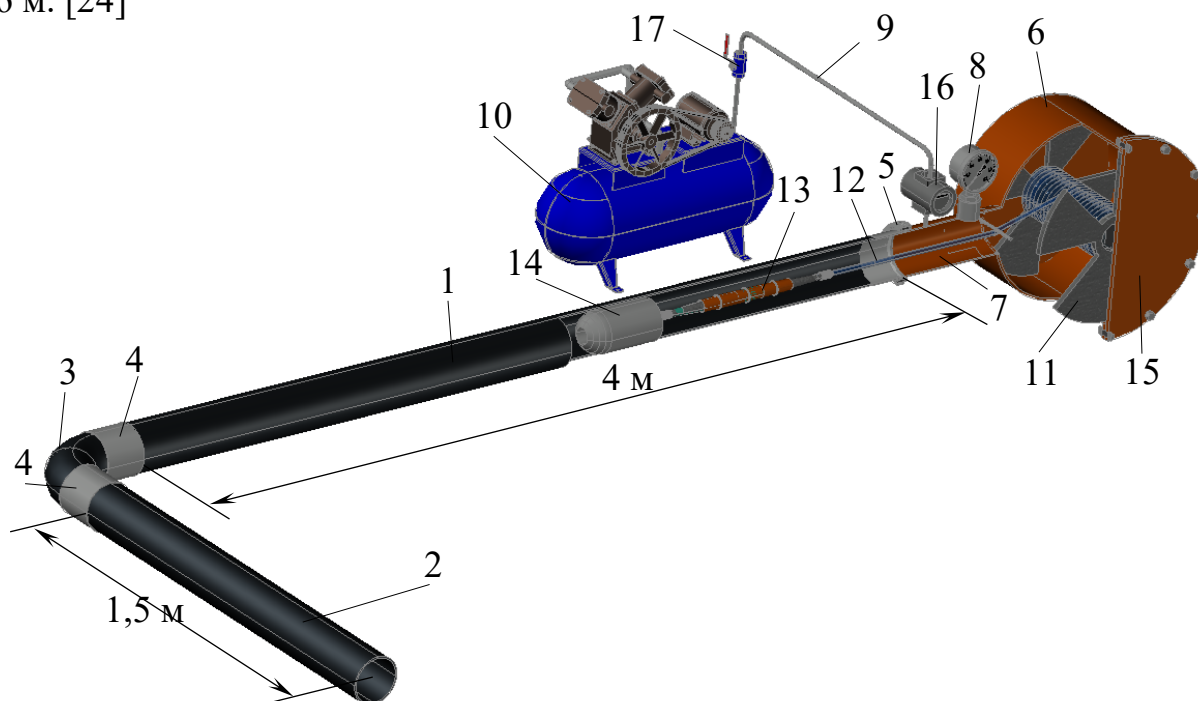
Щоб визначити необхідний запоршневий тиск, який необхідно забезпечити для стабільного протягування ремонтної системи трубопроводом з крутовигнутим відводом, експериментальні дослідження доцільно проводити в умовах, максимально наближених до реальних експлуатаційних. З цією метою змонтовано дослідну установку з металевих труб 1, 2 і крутовигнутого відводу 3 (рисунок 3.8), які за геометричними параметрами та міцнісними характеристиками моделюють

ділянку сталевого трубопроводу розподільної мережі з крутовигнутим відводом (рисунок 3.9). [23]



Рисунок 3.7 – Експериментальна установка для дослідження динаміки протягування байпасним поршнем ремонтної системи трубопроводом, який містить коліно

Експериментальна установка містить дві сталеві труби 1 і 2 завдовжки 4 м та 1,5 м відповідно, з внутрішнім діаметром 49 мм, між якими встановлено сталевий відвід 3 того ж діаметра з кутом вигину 90° та радіусом вигину 1,5 DN (де DN — умовний прохід трубопроводу). З'єднання елементів 1, 2 і 3 виконано муфтами 4 з різьбами. Загальна довжина експериментальної ділянки трубопроводу становить 5,6 м. [24]



1, 2 – сталеві труби; 3 – сталевий відвід 90° ; 4 – муфта; 5 – фланець;
 6 – герметична камера; 7 – трубна котушка; 8 – манометр; 9 – шланг;
 10 – компресор; 11 – барабан; 12 – гнучка трубка; 13 – ремонтна система;
 14 – поршень з осьовим отвором; 15 – кришка; 16 – газовий лічильник; 17 – кран
 Рисунок 3.8 – Схема експериментальної установки визначення необхідного тиску
 для протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом,
 який містить крутовигнутий відвід

До вхідного торця труби 1 фланцем 5 приєднано герметичну камеру 6, яка містить трубну котушку 7 (рисунок 3.8). У середині камери 6 розміщено барабан 11 із намотаною гнучкою трубкою 12, до якої закріплено ремонтну систему 13 і поршень 14 із осьовим отвором. Поршень проштовхували через трубну котушку 7 і запасовували у трубу 1. Тоді поміщали барабан 11 із намотаною гнучкою трубкою

12 у герметичну камеру 6 і кришкою 15 герметизували бічний торець герметичної камери 6. Трубна котушка 7 містить два патрубки, до одного з яких під'єднано манометр 8 для вимірювання тиску, а до другого шланг 9, який в свою чергу під'єднано до компресора 10. Контроль за витратою повітря здійснюється за допомогою газового лічильника 16, а його регулювання – краном 17, встановленим на виході компресора 10.



Рисунок 3.9 – Експериментальна установка визначення необхідного тиску для протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід

Підготовку експериментальної установки до протягування байпасним поршнем ремонтної системи виконано за тією ж послідовністю, яка описана для

експериментальної установки з скляним відводом (рисунок 3.7). Після завершення підготовчих операцій здійснювали фіксування початкових показів газового лічильника 16 (рисунок 3.8) і тоді відкривали кран 17 на виході компресора 10. Внаслідок цього тиск у запоршневому просторі наростав і поршень із осьовим отвором 14 починав рухатись та тягнути за собою ремонтну систему 13 сталеву трубою 1, сталевим коліном 2 та сталеву трубою 3. Під час протягування поршнем із осьовим отвором 14 ремонтної системи 13 виконували контроль показів манометра 8. У момент виходу поршня із осьовим отвором 14 із труби 3 здійснювалось фіксування кінцевих показів газового лічильника 16 та часу протягування. Тоді визначити витрату повітря під час протягування поршнем із осьовим отвором 14 ремонтної системи сталевими трубами 1, 2 та коліном 3.

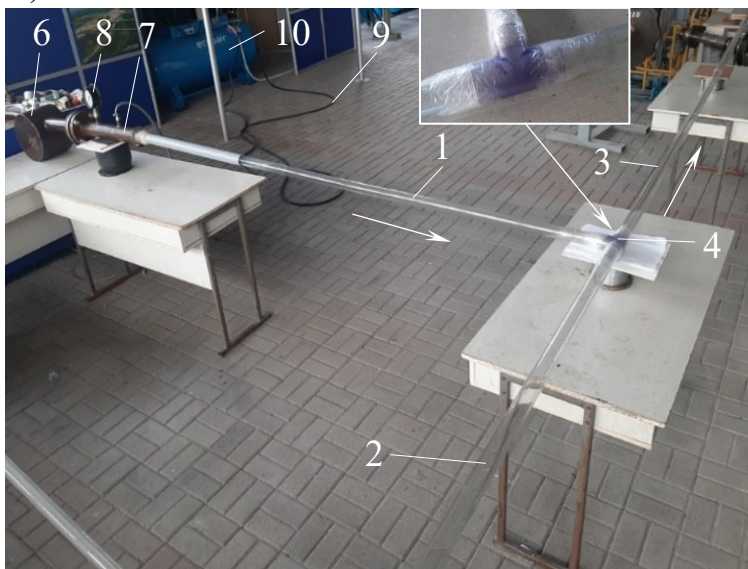
3.2.2 Експериментальні установки з трійником

Аналогічні експериментальним установкам із крутовигнутим відводом змонтовано експериментальні установки із трійником.

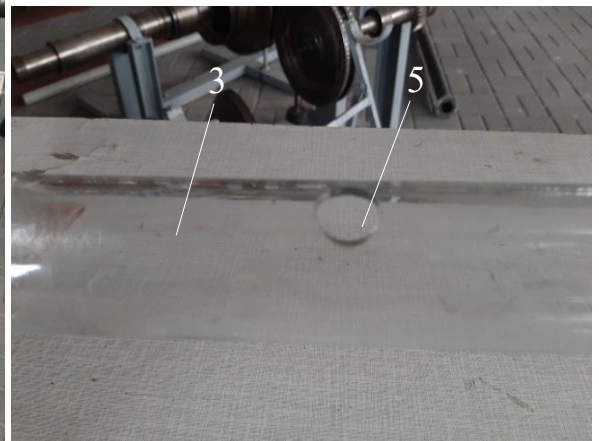
Для візуального спостереження за динамікою протягування ремонтної системи поршнем із осьовим отвором трубопроводом із трійником розроблено і змонтовано відповідну експериментальну установку. Така установка складається з трьох скляних труб 1, 2, 3 внутрішнім діаметром 38 мм і довжиною 2,4 м кожна між якими поміщено прозорий пластиковий рівнопрохідний трійник 4 внутрішнім діаметром 38 мм (рисунок 3.10, а). Скляні труби 1, 2, 3 і пластиковий трійник 4 з'єднано липкою стрічкою, яка також виконувала роль запобіжника тиску у разі його непередбачуваного збільшення понад допустиме значення. Перевагою такого прозорого трубопроводу є можливість візуального спостереження за динамікою протягування поршнем ремонтної системи та процесом встановлення ремонтного бандажа у місці важкодоступного локального дефекту трубопроводу, що є важливим для перевірки технологічності операцій. У скляній трубі 3 виконано отвір 5 (рисунок 3.10, б), який імітує локальний дефект трубопроводу у важкодоступному місці, розміщеному за трійником 4. До скляної труби 1

під'єднано герметичну камеру 6 з трубною катушкою 7 до одного з патрубків якої під'єднано манометр 8, а до другого шланг 9 від компресора 10. Манометром 8 фіксували тиск на вході в трубопровід під час протягування поршнем ремонтної системи. Повітря у запоршневий простір шлангом 9 подавали із ресивера компресора 10. У ресивері компресора 10 відбувалось стабілізування тиску. Краном на виході компресора 10 регулювали витрату повітря і, відповідно, швидкість руху поршня. Протилежний трійнику 4 торець скляної труби 2 заглушений, а скляної труби 3 відкритий і з нього відбувався вільний вихід повітря в атмосферу. За такої схеми поршень з скляної труби 1 в трійнику 4 змінював напрям руху у скляну трубу 3. [20, 21]

а)



б)



а) – загальний вигляд; б) – локальний дефект трубопроводу; 1, 2, 3 – скляна труба; 4 – трійник; 5 – отвір; 6 – герметична камера; 7 – трубна катушка; 8 – манометр; 9 – шланг; 10 – компресор

Рисунок 3.10 – Експериментальна установка для дослідження процесу доставки поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить трійник

Підготовку експериментальної установки до протягування поршнем ремонтної системи трубопроводом, який містить трійник, виконано за тією ж послідовністю, яка описана для крутовигнутого відводу.

Для експериментального визначення необхідного запоршневого тиску, щоб протягнути поршнем ремонтну систему трубопроводом з трійником експериментальну установку змонтовано з металевих труб та трійника (рисунок 3.11). Така установка, так як і установка яка містить крутовигнутий відвід (рисунок 3.11) також містить манометр і газовий лічильник.



Рисунок 3.11 – Експериментальна установка визначення необхідного тиску для протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить трійник

В усіх експериментальних установках подавання повітря здійснювали компресором Eccoair N=7,5 кВт, модель ECCO 10/15B, $P_{\max}=15$ бар, об'єм ресивера 500 л.

3.3 Результати експериментальних досліджень

Проведено серію експериментальних досліджень, а саме протягувань ремонтної системи поршнями із осьовим отвором трубопроводом, який містить скляний відвід (рисунок 3.7) та пластиковий прозорий трійник (рисунок 3.10). Це дало змогу візуально фіксувати рух поршнів і ремонтної системи під час

проходження фасонних елементів. У процесі експериментів не спостерігалось ознак руйнування чи пошкодження ні поршнів, ні елементів ремонтної системи. При входженні в скляний відвід або трійник поршень істотно знижував свою швидкість руху, аж до короткочасної повної зупинки, після якої за рахунок наростання тиску в запоршневому просторі відновлював рух і поступово долав фасонний елемент, протягуючи за собою ремонтну систему.

Встановлено, що поршні з осьовим отвором діаметром 14 мм застрягають у крутовигнутому відводі та трійнику. Причиною цього є недостатній перепад тиску, який формувалася на поршні. Він виявився замалим для створення рушійної сили, здатної компенсувати збільшені сили тертя, спричинені деформацією корпусу поршня та його притисканням до внутрішньої поверхні труби.

Під час проходження відводу (рисунок 3.12) та трійника (рисунок 3.13) поршень з осьовим отвором протягував ремонтну систему разом із установленим на ній ремонтним бандажем. У процесі руху бандаж притискався до внутрішньої поверхні фасонних елементів з увігнутого боку крутовигнутого відводу та в зоні переходу відгалуження до магістралі у трійнику. Експериментально встановлено, що міцність кріплення бандажа до еластичної оболонки суттєво впливає на надійність протягування. Якщо бандаж фіксувався недостатньо надійно, тертя із внутрішньою стінкою викликав часткове зсування бандажа вздовж оболонки. У випадку міцного кріплення зміщення або деформації бандажа не спостерігалось, а його положення залишалося стабільним упродовж усього проходження фасонних елементів.

Результати експериментальних вимірювань запоршневого тиску, коли поршень протягуючи ремонтну систему рухався крутовигнутим відводом експериментальної установки подано в таблиці 3.1. Запускання поршня з однаковим діаметром осьового отвору здійснювали тричі, після чого розраховували середнє значення запоршневого тиску. Під час руху поршня із діаметром осьового отвору 6 мм крутовигнутим відводом експериментальної установки величина запоршневого тиску становила 142000 Па, тоді як для поршня з діаметром осьового отвору 10 мм цей показник складав 36000 Па. При діаметрі

осьового отвору в поршні 14 мм відбувалось його застрягання у крутовигнутому відводі трубопроводу. [24] Це пояснюється недостатнім перепадом тиску, який формувався на поршні, що, у свою чергу, не забезпечив необхідної рушійної сили для подолання додаткових сил тертя, які виникають у місці крутовигнутих відводів трубопроводу [82-84].



а) – рух поршня середньою частиною відводу; б) – протягування ремонтної системи відводом

Рисунок 3.12 – Протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить скляний крутовигнутий відвід

Також під час експериментальних досліджень виміряно запоршневий тиск, який виникав коли байпасний поршень зупинявся безпосередньо за місцем локального дефекту стінки трубопроводу, до припинення подавання компресором повітря. Зафіксовано, що для поршня з осьовим отвором діаметром 6 мм величина

тиску сягала 94000 Па, тоді як для отвору діаметром 10 мм тільки 23000 Па (таблиця 3.1).



Рисунок 3.13 – Протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить прозорий пластиковий трійник

Результати чисельного моделювання (підрозділ 2.5.4.2) та експериментальних досліджень свідчать, що перепаду тиску на поршні суттєво збільшується із зменшенням діаметра остового отвору в ньому. Така залежність має важливе практичне значення, оскільки, для прикладу, величина перепаду тиску на поршні, коли він загальмував одразу за місцем локального дефекту стінки

трубопроводу, до припинення подавання компресором повітря, безпосередньо впливає на рушійну силу, що діє на поршень. Така рушійна сила призводить до збільшення розтягувальної сили в гнучкій трубці, внаслідок чого зростають розтягувальні навантаження в її матеріалі, знижується запас міцності та підвищується ризик механічного пошкодження або розриву (підрозділ 2.4). З іншої сторони збільшення рушійної сили, яка діє на поршень підвищує його здатність долати крутовигнуті відводи та протягувати ремонтну систему трубопроводом. Величина рушійної сили, що діє на поршень із осьовим отвором рівна

$$F_n = \Delta P \frac{\pi(D_n^2 - D_o^2)}{4}, \quad (3.1)$$

де ΔP – перепаду тиску на поршні; D_n – діаметр поршня; D_o – діаметр осьового отвору в поршні.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних вимірювань перепаду тиску на поршні з осьовим отвором

Діаметр осьового отвору в поршні, мм	Перепаду тиску на поршні, Па	
	поршень у крутовигнутому відводі	поршень зупинився одразу за місцем локального дефекту
6	142000	94000
10	36000	23000
14	-	-

За формулою (3.1) виконано розрахунок величини рушійної сили, що діє на поршень за різних діаметрів його осьового отвору. Такі розрахунки виконано за результатами чисельного моделювання та експериментальних досліджень для випадків руху поршня відводом трубопроводу та його зупинки одразу за місцем локального дефекту трубопроводу до вимкнення компресора (таблиця 2.3, таблиця 3.1).

За отриманими результатами побудовано графічні залежності, які наочно ілюструють закономірності зміни рушійної сили залежно від діаметра осьового отвору в поршні для випадку коли він знаходиться у крутовигнутому відводі (рисунок 3.14) та зупинився одразу за місцем локального дефекту трубопроводу (рисунок 3.15). На побудованих графічних залежностях наведено результати чисельного моделювання (таблиця 2.3) та експериментальних досліджень (таблиця 3.1). Залежність має виражений спадний характер. Зі збільшенням діаметра осьового отвору в байпасному поршні величина рушійної сили істотно зменшується. Так, коли поршень рухається крутовигнутим відводом для осьового отвору в поршні діаметром 6 мм вона досягає 260 Н, для діаметра 10 мм становить 61,6 Н, а за діаметра 14 мм зменшується до 7,5 Н. При цьому крива зміни демонструє нелінійний характер спадання. Найрізкіше зменшення спостерігається в діапазоні малих діаметрів від 6 мм до 10,5 мм, тоді як подальше збільшення діаметра отвору понад 10,5 мм призводить до поступового вирівнювання кривої та незначного зменшення рушійної сили.

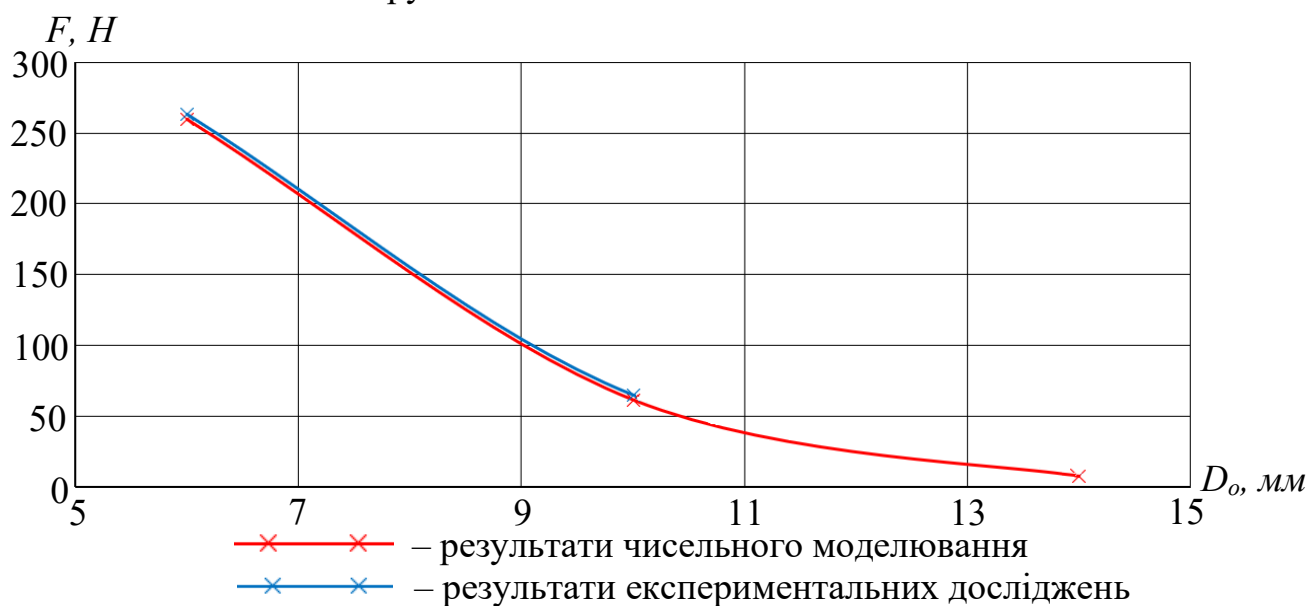


Рисунок 3.14 – Залежність величини рушійної сили F , що діє на байпасний поршень, у момент, коли він знаходиться у крутовигнутому відводі від діаметра його осьового отвору D_o

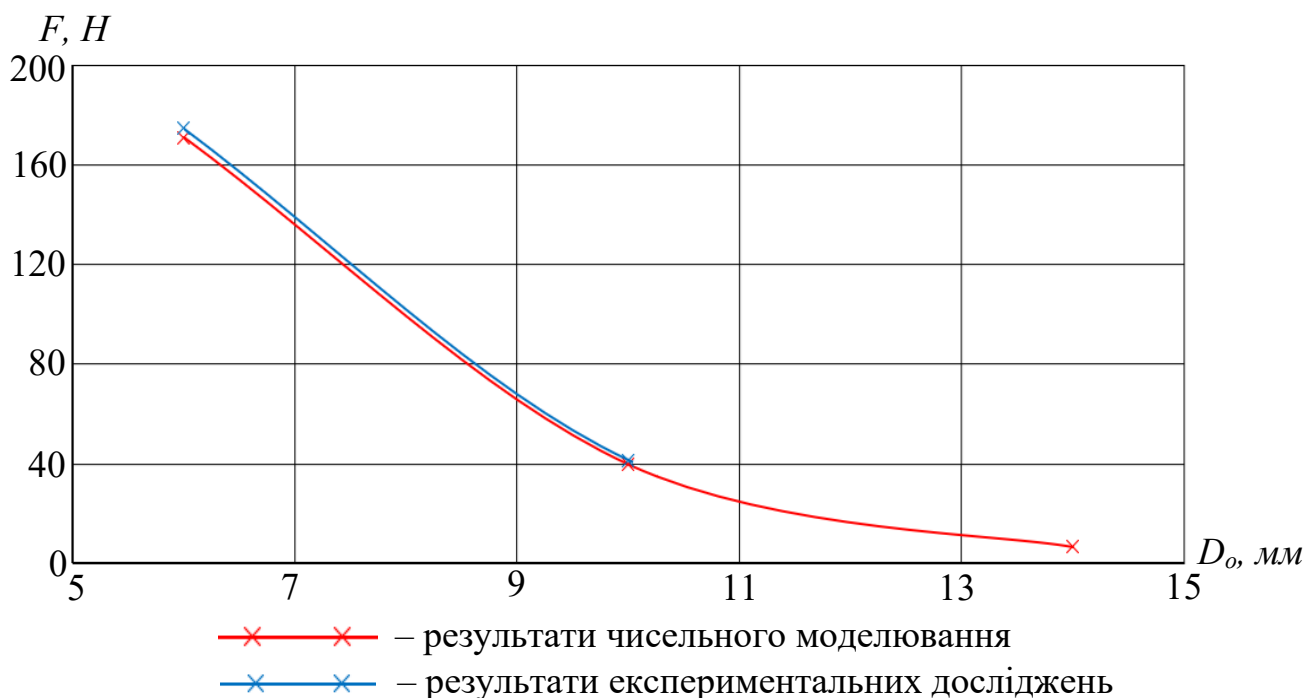


Рисунок 3.15 – Залежність величини рушійної сили F , що діє на поршень, від діаметра його осьового отвору D_o у момент, коли він зупинився одразу за місцем локального дефекту (до вимкнення компресора)

Результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з результатами чисельного моделювання. Похибка не перевищує 5 %.

Величина рушійної сили є визначальною для розрахунку необхідної товщини стінки гнучкої трубки, яка повинна забезпечувати її міцність (див. підрозділ 2.4).

Зміну тиску з часом на початку трубопроводу під час руху поршня 14 (рисунок 3.9) з осьовим отвором і протягування за собою ремонтної системи 13 експериментальною установкою, яка містить крутовигнутий відвід 3 показано на графіку наведеному на рисунку 3.16. У момент долання рухомою системою сил тертя спокою спостерігали короткочасне збільшення тиску до 0,009 МПа. Після початку руху поршня тиск знижується до 0,0075 МПа і коли він рухався прямолінійною ділянкою сталеві труби 1 практично не змінювався.

Коли поршень 14 починав входити в крутовигнутий відвід 3 тиск різко збільшувався до 0,036 МПа. Таке різке збільшення пояснюється сповільненням поршня 14, що обумовлено початком його руху криволінійною ділянкою трубопроводу і викривленням, яке призводить до виникнення додаткових сил тертя

зумовлених збільшенням контактних сил [81-83]. Коли поршень 14 виходить з відводу 3 відбувається падіння тиску, так як додаткові сили тертя, зумовлені притисканням поршня до внутрішньої стінки через викривлення перестають діяти. Тиск падав до 0,013 МПа і був стабільним до тих пір поки не відбулось гальмування поршня 14 гнучкою трубкою 12. Коли поршень 14 загальмував повітря проходило через його осьовий отвір. Таке зменшення площі прохідного перерізу потоку призводило до збільшення тиску на початку трубопроводу до 0,022 МПа. Витрата повітря під час руху поршня складала 0,0104 м³/с.

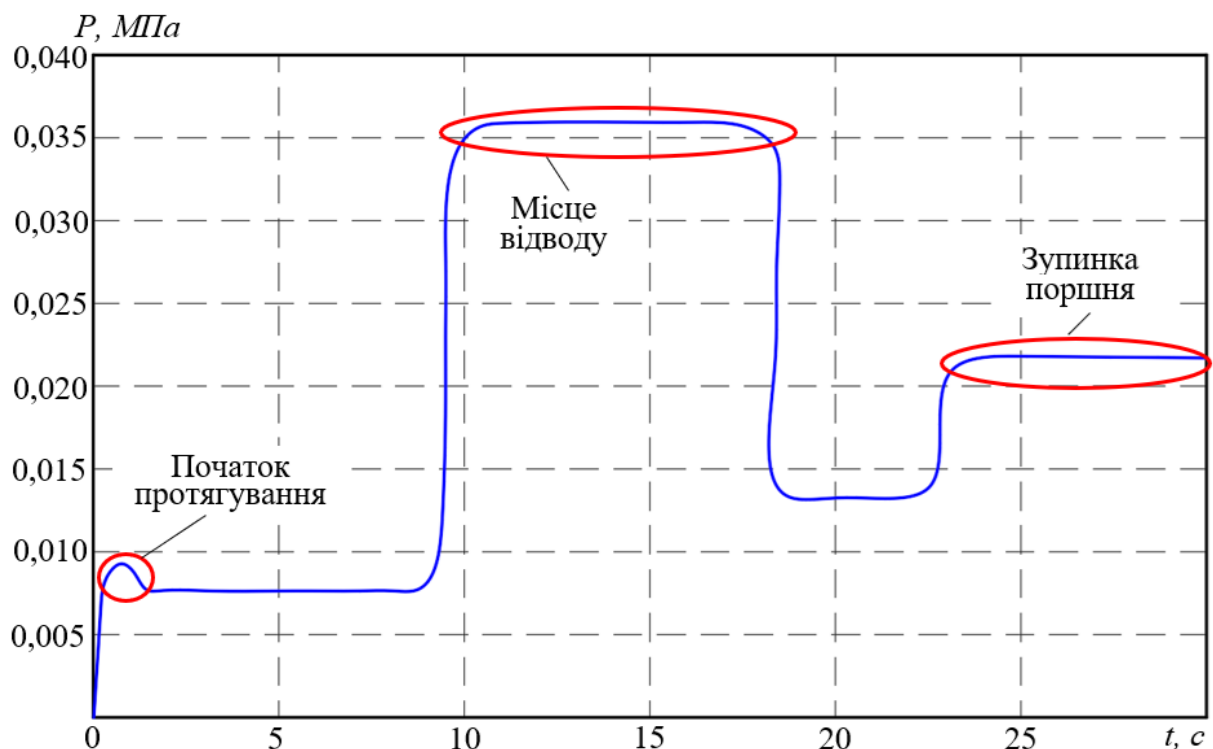


Рисунок 3.16 – Зміна тиску на початку трубопроводу з часом під час протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід

Аналогічне дослідження закономірностей зміни тиску на початку трубопроводу виконували під час досліджень протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить трійник (рисунок 3.11). Зміну тиску з часом на початку трубопроводу під час руху поршня з осьовим отвором і протягування за собою ремонтної системи експериментальною установкою, яка містить трійник показано на графіку наведеному на рисунку 3.18.

Так як і у попередньому випадку у момент долання рухомою системою сил тертя спокою спостерігали короткочасне збільшення тиску до 0,009 МПа. Після початку руху поршня тиск знижується до 0,0077 МПа і коли він рухався прямолінійною ділянкою сталеві труби практично не змінювався.

Коли поршень був у трійнику тиск різко збільшувався до 0,102 МПа через сповільнення поршня і його викривлення у трійнику та збільшення контактних сил. Як і у попередньому випадку коли поршень виходив із трійника також відбувалось падіння тиску до величини 0,011 МПа і його стабілізація до гальмування поршня гнучкою трубкою. Коли поршень загальмував відбулось збільшення тиску до 0,023 МПа. Витрата повітря під час руху поршня складала 0,0111 м³/с.

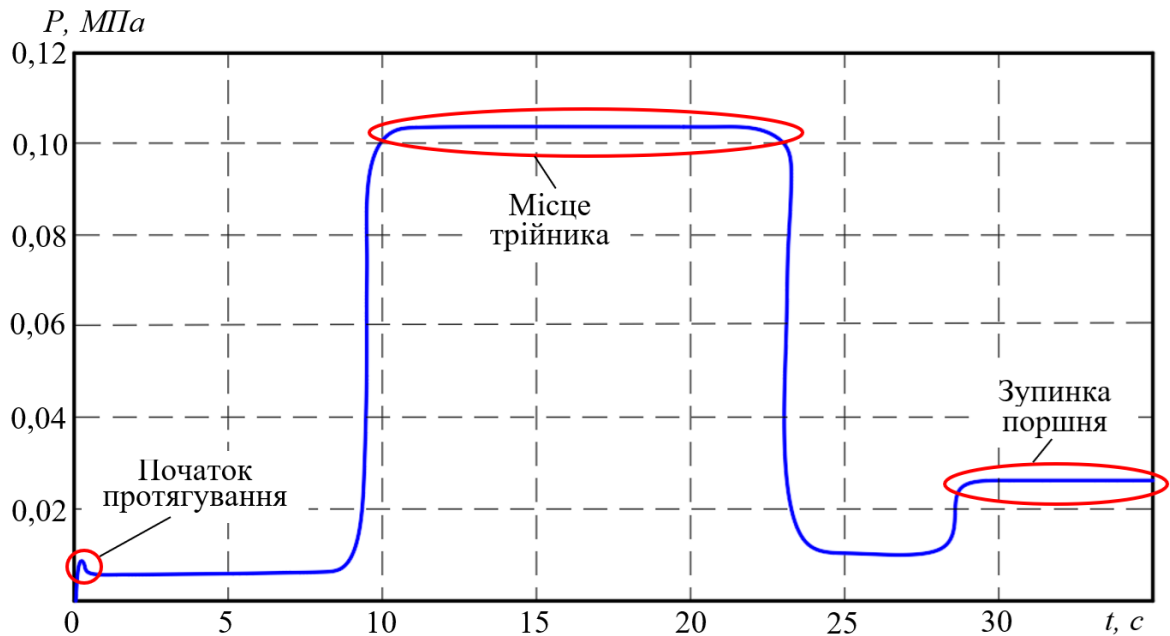


Рисунок 3.18 – Зміна тиску на початку трубопроводу з часом під час протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи трубопроводом, який містить трійник

3.4 Висновки до розділу 3

1. Експериментальні дослідження засвідчили, що ремонтну систему можна протягнути поршнем з осьовим отвором трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід або трійник. При цьому діаметр осьового отвору поршня є визначальним фактором, що впливає на величину перепаду тиску на ньому,

рушійну силу та відповідно тягове зусилля з яким він протягує ремонтну систему. Зменшення діаметра осьового отвору в поршні призводить до зростання перепаду тиску на ньому та, відповідно, до істотного підвищення величини рушійної сили. Виявлена залежність носить нелінійний, виражений спадний характер. Зі збільшенням діаметра осьового отвору в поршні величина рушійної сили істотно зменшується.

2. Коли поршень перебуває на прямолінійній ділянці трубопроводу у разі збільшенні діаметра осьового отвору в ньому від 6 мм до 10 мм величина рушійної сили зменшується від 170,8 Н до 39,7 Н, тоді як подальше збільшення діаметра осьового отвору до 14 мм зменшує її до рівня 6,6 Н. Найрізкіше зменшення спостерігається в діапазоні малих діаметрів від 6 мм до 10,5 мм, тоді як подальше збільшення діаметра осьового отвору в поршні понад 10,5 мм призводить до поступового вирівнювання кривої та незначного зменшення рушійної сили. Такі тенденції однакові як для випадків перебування поршня у прямолінійних ділянках, так і у крутовигнутих відводах трубопроводу, проте у відводах величини перепаду тиску на поршні і відповідно рушійної сили є істотно більшими внаслідок додаткових локальних гідравлічних втрат та посилення турбулентності. Одержані закономірності підтверджують, що саме діаметр осьового отвору в поршні є ключовим фактором, який визначає динаміку руху поршня трубопроводом та його здатність долати фасонні елементи, зокрема крутовигнуті відводи.

3. Результати виконаних досліджень свідчать, що за значних діаметрів осьового отвору в поршні (більше 10,5 мм) величина рушійної сили, яка діє на нього, є недостатньою для забезпечення його стабільного руху трубопроводом, що істотно знижує здатність долати крутовигнуті відводи та доставляти ремонтні елементи у важкодоступні місця трубопроводів. Зокрема, за діаметра осьового отвору 14 мм зафіксовано застрягання поршня у крутовигнутому відводі експериментальної установки. Водночас, зменшення діаметра осьового отвору призводить до істотного зростання навантаження на гнучку трубку, коли поршень зупинився безпосередньо за місцем локального дефекту стінки, до припинення подавання повітря компресором. Так, при діаметрі осьового отвору 6 мм величина

розтягувальної сили, що виникає в гнучкій трубці, сягає 170,8 Н, що створює високий ризик її пошкодження або навіть руйнування. Раціональним вибором діаметра осьового отвору в поршні є максимально можливий діаметр отвору, за якого забезпечується достатня рушійна сила для подолання фасонних елементів і водночас дотримуються міцнісні вимоги до гнучкої трубки.

Основні результати третього розділу опубліковано в працях [16, 20-24].

РОЗДІЛ 4

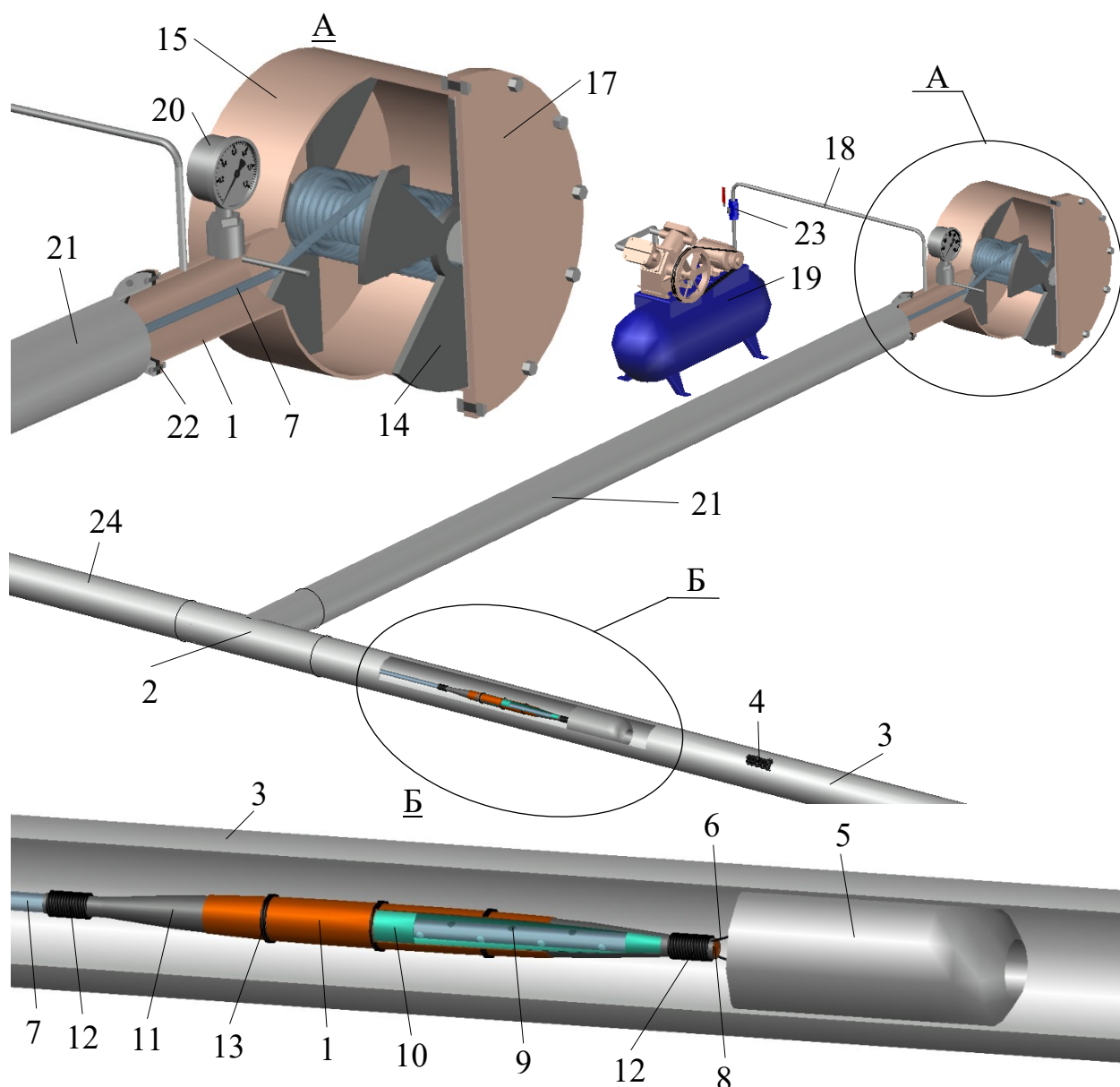
РОЗРОБЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА І ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЛОКАЛЬНОГО ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

Розроблено технологію внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби трубопровідних мереж у важкодоступних місцях “Тяговий поршень^Б”. Така технологія полягає у доставленні трубопроводом ремонтної системи до локального дефекту стінки труби у важкодоступне місце, зокрема за крутовигнутий відвід, трійник, і встановленні там ремонтного бандажа попередньо просякненого епоксидним клеєм. Доставлення запропоновано виконати поршнем з наскрізним отвором із силіконового компаунда, а притискання ремонтного бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу в місці локального дефекту подаванням повітря у еластичну оболонку, на яку він насунутий. Особлива увага приділена експериментальній частині дослідження та промисловій апробації розробленої технології, які підтвердили її працездатність і технологічність виконання усіх операцій.

4.1 Розроблення технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж

Щоб забезпечити можливість доставки та встановлення ремонтного бандажа у місці важкодоступного спричиненого корозійними процесами локального дефекту трубопроводу газорозподільної або теплової мережі розроблено технологію “Тяговий поршень^Б”, яка полягає у наступному. Ремонтний бандаж виготовляють із поліестеру, склотканини, скловолокна, поліуретану або поліефіру. Довжина бандажа не повинна перевищувати діаметр трубопроводу більше ніж у 3 рази. Щоб доставити ремонтний бандаж 1 за трійник 2 трубопроводу 3 в місце локального дефекту 4 до початку виконання робіт циліндричний поршень 5 із силіконового компаунда тягами 6 треба прикріпити до гнучкої трубки 7 (рисунок

4.1). Початок гнучкої трубки 7 в місці кріплення до неї поршня 5 має бути заглушений заглушкою 8. У стінці гнучкої трубки 7, на її початку, мають бути виконані отвори 9. [21]



1 – ремонтний бандаж; 2 – трійник; 3, 21, 24 – трубопровід; 4 – локального дефект; 5 – поршень із осьовим отвором; 6 – тяга; 7 – гнучка трубка; 8 – заглушка; 9 – отвір; 10 – еластична оболонка; 11 – поліетиленова плівка; 12, 13 – зав'язка; 14 – барабан; 15 – герметична камера; 16 – трубна котушка; 17 – кришка; 18 – шланг; 19 – компресор; 20 – манометр; 22 – фланець; 23 – кран

Рисунок 4.1 – Схема доставки ремонтного бандажа до місця локального дефекту трубопроводу

На місці виконання робіт на початок гнучкої трубки 7 насувають еластичну оболонку 10, діаметр якої має бути менший внутрішнього діаметра трубопроводу 3, та обгортають її поліетиленовою плівкою 11. Тоді еластичну оболонку 10 і поліетиленову плівку 11 у двох місцях міцно прив'язують зав'язками 12 до гнучкої трубки 7. Отвори 9 у гнучкій трубці 7 повинні бути в середині еластичної оболонки 10. На поліетиленову плівку 11 насувають просякнутий спеціальною смолою (поліефірною, вініловим ефіром або епоксидною) змішаною з затверджувачем ремонтний бандаж 1, який прив'язують у двох-трьох місцях неміцними зав'язками 13.

Поліетиленова плівка 15 призначена для запобігання прилипання ремонтного бандажа 1 до еластичної оболонки 11. Також для цього можна застосовувати фольгу, яка повинна виступати за межі бандажа 1 не менше ніж на 20 мм.

Протилежний кінець гнучкої трубки 7 міцно закріплюють до валу барабана 14 і намотують на нього. Бокові диски барабана 14 повинні мати прорізи. Поршень 5 із прикріпленням до нього початком гнучкої трубки 7 і ремонтним бандажем 1 поміщають у середину циліндричної герметичної камери 15 і витягують їх з трубної котушки 16. Тоді у середину циліндричної герметичної камери 15 в паз поміщають барабан 14 із намотаною гнучкою трубкою 7. Кришкою 17 закривають бічний торець герметичної камери 15.

Довжина гнучкої трубки 7 має бути такою, щоб коли поршень 5 затягне ремонтний бандаж 1 до місця локального дефекту 4 трубопроводу 3 вона була повністю розмотана з барабана 14 і загальмувала поршень 5. Для визначення необхідної довжини гнучкої трубки 7 перед виконанням ремонтних робіт треба визначити віддаль від торця ремонтного трубопроводу 3 до місця локального дефекту 4 трубопроводу 3.

До одного із штуцерів трубної котушки 16 шлангом 18 приєднують компресор 19, а до другого манометр 20. Тоді у робочому котловані поршень 5 запасовують у внутрішню порожнину трубопроводу 21 і до його торця хомутом або фланцем 22 кріплять трубну котушку 16 герметичної камери 15. Таким чином

підготовка до виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту 4 трубопроводу 3 з трійником 2 завершена.

Щоб затягнути ремонтний бандаж 1 до місця локального дефекту 4 трубопроводу 3 відкривають кран 23 і компресор 19 шлангом 18 нагнітає повітря в запоршневий простір. Тиск за поршнем 5 зростає, що фіксують за показами манометра 20, і він починає рухатись трубопроводом 21 і тягнути за собою гнучку трубку 7 з ремонтним бандажем 1. Гнучка трубка 7 розмотується з барабана 14, який обертається. Під час руху поршень 5 також очищує внутрішню порожнину трубопроводу 3.

Щоб поршень 5 у трійнику 2 з його відгалуження повернув у трубопровід 3, який містить локальний дефект 4, у цю ж сторону повинен рухатись потік повітря. Тому трубопровід 24 має бути перекритий. У такому випадку в трійнику 2 поршень 5, який виготовлений із гнучкого гіперпружного матеріалу (силіконового компаунда), буде рухатись за потоком і змінить напрямок руху і із відгалуження трійника 2 поверне у трубопровід 3. За собою поршень 5 потягне до локального дефекту 4 трубопроводу 3 гнучку трубку 7 з ремонтним бандажем 1.

Тоді коли поршень 5 затягне ремонтний бандаж 1 до місця локального дефекту 4 трубопроводу 3, гнучка трубка 7 повністю розмотається з барабана 14. Оскільки, кінець гнучкої трубки 7 міцно закріплений до валу барабана 14, то вона загальмує поршень 5. У момент зупинки поршня 5 відбудеться різке збільшення тиску в запоршневому просторі, що фіксують за показами манометра 20. Щоб збільшення тиску не було надто великим і не розірвалась гнучка трубка 7 циліндричний поршень 5 має бути з осьовим наскрізним отвором. Повітря, яке після гальмування поршня 5 подає компресор 19, буде проходити через цей отвір. Місцезнаходження поршня 3 можна проконтролювати відеокамерою проштовхнутою з протилежного кінця трубопроводу 3.

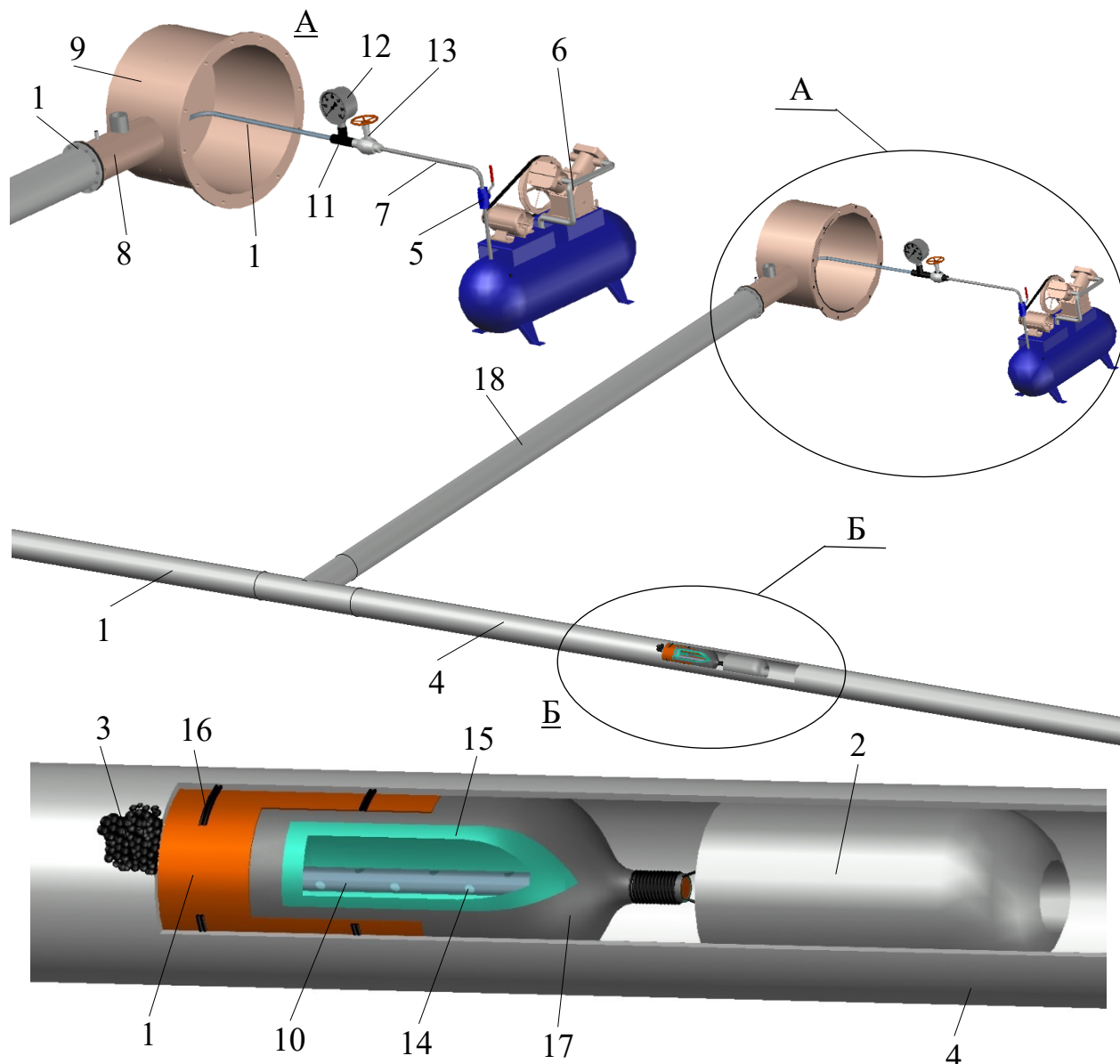
Коли ремонтний бандаж 1 поршнем 2 доставлено у місце локального дефекту 3 трубопроводу 4 перекривають кран 5 і припиняють подавання компресором 6 повітря у запоршневий простір (рисунок 4.1). Тоді шланг 7 від'єднують від штуцера трубної котушки 8, знімають кришку бічного торця герметичної камери 9. Через

прорізи в боковому диску барабана 14 (рисунок 4.1) відкріплюють кінець гнучкої трубки 10 (рисунок 4.2) від його валу. Тоді барабан 14 (рисунок 4.1) витягують із герметичної камери 9 (рисунок 4.2), а до гнучкої трубки 10 під'єднують трійник 11 з манометром 12, вентиль 13 та шланг 7 від компресора 6. Відкривають кран 5, вентиль 13 і компресором 6 нагнітають повітря в гнучку трубку 10, яке через отвори 14 у її стінці надходить у еластичну оболонку 15. У результаті нагнітання повітря відбувається збільшення тиску у еластичній оболонці 15, її роздування, що призводить до розривання немічних зав'язок 16 і щільного притискання та адгезії ремонтного бандажа 1 до внутрішньої стінки трубопроводу 4 в місці локального дефекту 3. Тиск у еластичній оболонці 15 контролюють манометром 12 та плавно збільшують до необхідного (0,9-1 атм) вентилем 13.

Щільно притиснутий до внутрішньої стінки трубопроводу 4 еластичною оболонкою 15 ремонтний бандаж 1 у місці локального дефекту 3 витримують певний час, до затвердіння смоли, якою він просякнутий. Для пришвидшення затвердіння смоли в еластичну оболонку 15 доцільно нагнітати тепле повітря. Щоб забезпечити потік теплого повітря в еластичній оболонці 15 треба зробити отвір. Коли відбулось затвердіння і з'єднання ремонтного бандажа 1 з внутрішньою стінкою трубопроводу 4 у місці локального дефекту 3 від'єднують гнучку трубку 10 від трійника 11. У результаті тиск у еластичній оболонці 15 зменшується до атмосферного і вона відходить від внутрішньої стінки трубопроводу 4 і ремонтного бандажа 1. Так як, еластична оболонка 15 обгорнута поліетиленовою плівкою 17 то її приклеювання до ремонтного бандажа 1 не відбувається. Таким чином встановлення ремонтного бандажа 1 у місці локального дефекту 3 трубопроводу 4 завершено.

Щоб видалити поршень 2, еластичну оболонку 15 та гнучку трубку 10 із трубопроводу 4 необхідно закрити герметичну камеру 9. Для цього кінець гнучкої трубки 10 поміщують у її внутрішню порожнину і монтують кришку герметичної камери 9. Тоді шланг 7 від компресора 6 приєднують до штуцера трубної котушки 8 герметичної камери 9. Відкривають кран 5 і компресором 6 нагнітають повітря в трубопроводу 4, 18 та 19. У результаті тиск у запоршневому просторі зростає і

поршень 2 починає рухатись трубопроводом 4 і витягувати за собою еластичну оболонку 15 та гнучку трубку 10. Після видалення з трубопроводу 4 поршня 2, еластичної оболонки 15 та гнучкої трубки 10 демонтують герметичну камеру 9. [21, 25]



- 1 – ремонтний бандаж; 2 – поршень; 3 – локального дефект;
 4, 18, 19 – трубопровід; 5 – кран; 6 – компресор; 7 – шланг; 8 – трубна котушка; 9
 – герметична камера; 10 – гнучка трубка; 11 – трійник; 12 – манометр; 13 –
 вентиль; 14 – отвір; 15 – еластична оболонка; 16 – зав'язка;
 17 – поліетиленова плівка

Рисунок 4.2 – Схема внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажа в місці локального дефекту важкодоступної ділянки трубопроводу

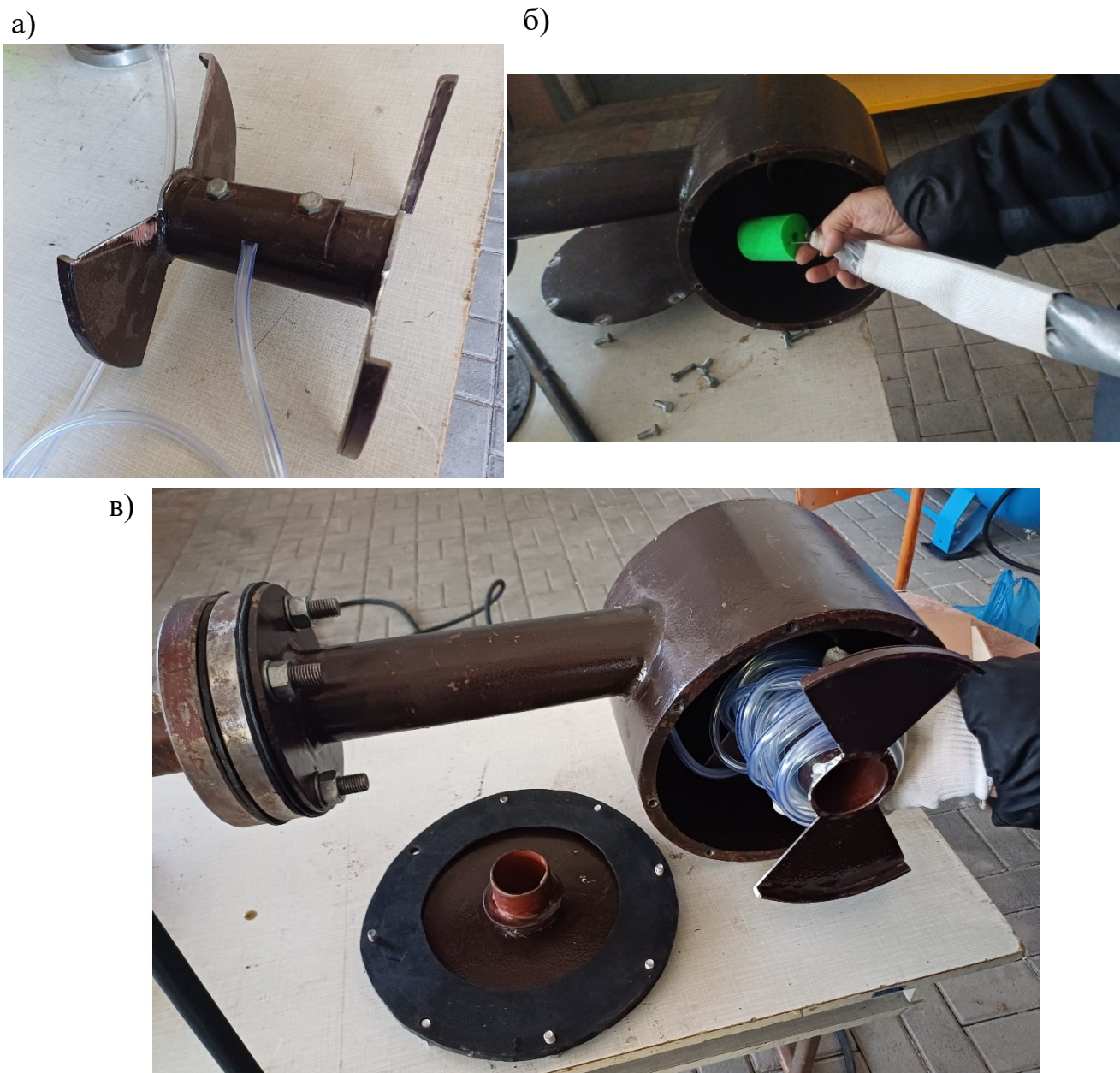
Наступними етапами є випробування відремонтованого трубопроводу тиском і внутрішньотрубний відеоконтроль, який найкраще здійснювати за допомогою робота з гусеничним рушієм.

4.2 Експериментальна апробація технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж

Задачами експериментальної апробації є:

- визначити чи за допомогою розробленої технології “Тяговий поршень”^Б можна встановити ремонтний бандаж у важкодоступному місці локального дефекту трубопроводу, розташованого за крутовигнутим коліном, трійником;
- визначити який потрібний тиск у еластичній оболонці, щоб вона щільно притискала ремонтний бандаж до стінки трубопроводу.

Для перевірки можливості встановлення ремонтних бандажів у місці локального дефекту трубопроводу, розташованого за відводом трубопроводу використано лабораторну експериментальну установку з скляних труб і скляного відводу (рисунок 3.7), а за трійником з скляних труб і прозорого пластикового трійника (рисунок 3.10). Суттєвою перевагою таких прозорих трубопроводів є можливість візуального спостереження за процесом встановлення ремонтного бандажа, що є важливим для перевірки технологічності операцій. До байпасного поршня прикріплено ремонтну систему. Тоді протилежний до місця кріплення ремонтної системи вільний кінець гнучкої трубки спеціально вигнутою притискною пластиною болтами притискали до валу барабана (рисунок 4.3, а) і гнучку трубку рівномірно намотували на нього. Поршень із прикріпленою до нього ремонтною системою бандажа помістили всередину циліндричної герметичної камери (рисунок 4.3, б) та прошовхнули трубою катушкою. Тоді всередину герметичної камери встановлювали барабан із намотаною гнучкою трубою (рисунок 4.3, в) і бічний торець камери герметизували кришкою.

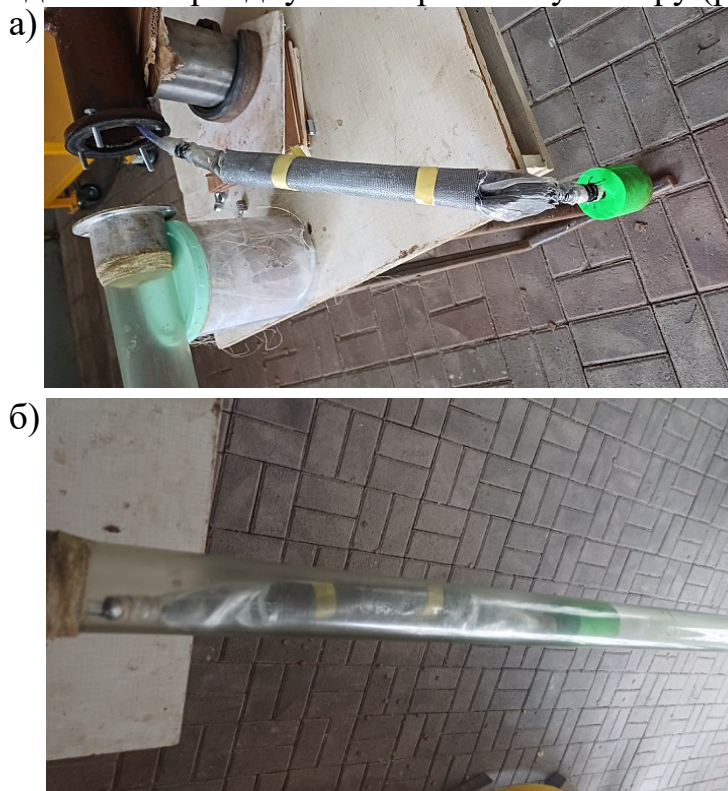


а) – прикріплена до валу барабана гнучка трубка; б) – поміщення у циліндричну герметичну камеру байпасного поршня з ремонтною системою; в) – поміщений у циліндричну герметичну камеру барабан із намотаною гнучкою трубкою

Рисунок 4.3 – Підготовка герметичної камери

До витягнутої з трубної котушки ремонтної системи щільно кріпили ремонтний бандаж, просочений епоксидним клеєм. Фіксували ремонтний бандаж малярною стрічкою, що забезпечувало надійне його притискання до еластичної оболонки (рисунок 4.4, а). Байпасний поршень разом із ремонтною системою

запасовували у першу скляну трубу експериментального трубопровода тоді до її торця фланцевим з'єднанням приєднували герметичну камеру (рисунок 4.4, б).



а) – підготовлена до протягування ремонтна система; б) – запасовані в скляну трубу байпасний поршень із ремонтною системою

Рисунок 4.4 – Підготовка байпасного поршня та ремонтної системи до протягування

Після подавання у запоршневий простір повітря компресором воно призводило до поступового збільшення тиску і поршень починав рухатись скляним трубопроводом та протягувати за собою ремонтну систему і гнучку трубку (рисунок 4.5, а). Гнучка трубка розмотувалась із поміщеного всередині герметичної камери барабана. Таким чином долаючи прямолінійні ділянки і відвід поршень доставив ремонтну систему до місця встановлення бандажа. У момент, коли гнучка трубка повністю розмоталася з барабана, її жорстке кріплення до валу барабана спричинило різке гальмування байпасного поршня. При цьому значного підвищення тиску у запоршневому просторі не спостерігалось, оскільки частина повітря виходила через осьовий отвір поршня. Після зупинки поршня та доставки

ремонтного бандажа до місця його встановлення (рисунок 4.5, б) подачу повітря припиняли. [23]

а)



б)



а) – протягування байпасним поршнем ремонтної системи; б) – ремонтна система доставлена до місця встановлення ремонтного бандажа

Рисунок 4.5 – Доставка байпасним поршнем ремонтної системи до місця встановлення ремонтного бандажа

Після припинення подавання повітря демонтували кришку герметичної камери і через проріз у боковому диску барабана (рисунок 4.6, а) від'єднували

кінець гнучкої трубки від валу барабана. До вільного кінця трубки приєднували вузол регулювання тиску в еластичній оболонці, що забезпечувало можливість плавного нагнітання тиску в ній до необхідної величини. Тоді до вузла регулювання тиску під'єднували шланг від компресора для подавання стисненого повітря в еластичну оболонку (рисунок 4.6, б).

а)



б)



а) – відкрита герметична камера після протягування ремонтної системи;

б) – під'єднаний вузол регулювання тиску у еластичній оболонці

Рисунок 4.6 – Підготовка до встановлення ремонтного бандажа

Відкривши кран на виході компресора та вентиль на вузлі регулювання стиснене повітря з ресивера гнучкою трубкою подали в еластичну оболонку. У результаті цього в еластичній оболонці поступово зростав тиск, що призвело до її розширення і розриву малярної стрічки, якою фіксували ремонтний бандаж. Тоді ремонтний бандаж під дією роздутої еластичної оболонки рівномірно притиснув до внутрішньої стінки скляної труби ремонтний бандаж (рисунок 4.7). Регулюванням подавання повітря в еластичну оболонку визначили необхідний тиск для притискання ремонтного бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу. Він склав від 0,09 МПа до 0,10 МПа. Весь необхідний час для повного схоплення епоксидного клею тиск у еластичній оболонці підтримували в установлених межах, що дало змогу забезпечити необхідні зусилля притискання та необхідну адгезію бандажа до внутрішньої стінки труби.



Рисунок 4.7 – Притиснутий до внутрішньої стінки трубопроводу еластичною оболонкою ремонтний бандаж

Після приклеювання ремонтного бандажа до внутрішньої стінки скляної труби гнучку трубку від'єднували від вузла регулювання тиску, тиск всередині еластичної оболонки вирівнювався з атмосферним (рисунок 4.8, а) і вона відходила від внутрішньої стінки скляної труби. Приклеюванню еластичної оболонки до скляної трубки запобігала поліетиленова плівка. Тоді кінець гнучкої трубки поміщали в герметичну камеру і герметизували її кришкою. Подавання стисненого повітря в запоршневий простір призводило до відновлення руху поршня скляної трубою і він за собою витягував еластичну оболонку, поліетиленову плівку та гнучку трубку (рисунок 4.8, б). Після цього залишався тільки внутрішньотрубно встановлений ремонтний бандаж на внутрішній стінці трубопроводу (рисунок 4.9)



а) – деаерована еластична оболонка; б) – протягування байпасним поршнем еластичної оболонки та гнучкої трубки

Рисунок 4.8 – Видалення з трубопроводу байпасного поршня та еластичної оболонки з гнучкою трубкою

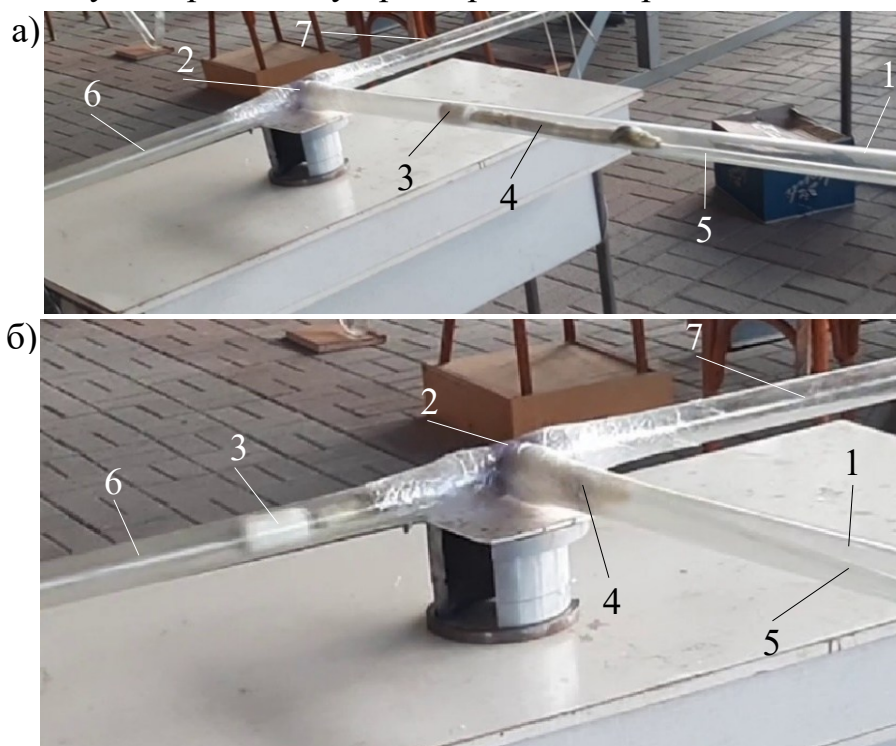


Рисунок 4.9 – Внутрішньотрубно встановлений ремонтний бандаж

Щоб визначити чи можна ремонтну систему встановити за трійником трубопроводу експериментальні

Для перевірки можливості встановлення ремонтних бандажів у місці локального дефекту трубопроводу, розташованого за трійником застосовано лабораторну експериментальну установку наведену на рисунку 3.10.

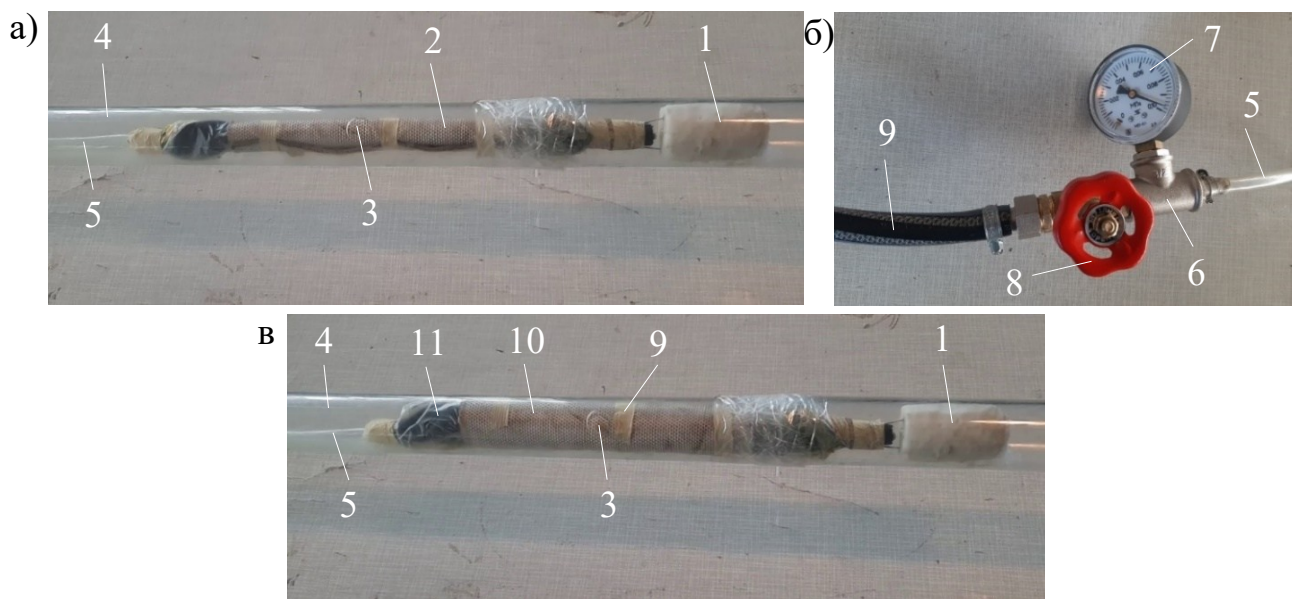
Після відкриття крана на виході компресора із його ресивера шлангом повітря поступало в запоршневий простір тиск у якому збільшувався і скляною трубою 1 до трійника 2 поршень 3 протягував ремонтну систему 4 та гнучку трубку 5 (рисунок 4.10, а), яка розмотувалась із поміщеного у герметичну камеру барабана. Із скляної труби 1 поршень 3 заходив у пластиковий трійник 2 в якому змінював напрям руху в сторону скляної труби 6, так як скляна труба 7 заглушена. За собою поршень 3 у скляну трубу 6 трійником 2 зтягував ремонтну систему 4 (рисунок 4.10, б) і далі протягував її до місця локального дефекту. Під час руху поршня 3 скляними трубами 1 та 6 і пластиковим трійником 2 експериментальної установки фіксували тиск у запоршневому просторі манометром.



а) – протягування ремонтної системи скляною трубою; б) – протягування ремонтної системи пластиковим трійником; 1, 6, 7 – склянка труба; 2 – пластиковий трійник; 3 – поршень; 4 – ремонтна система; 5 – гнучка трубка

Рисунок 4.10 – Доставка поршнем ремонтної системи до місця локального дефекту

Коли поршень 1 затягнув ремонтну систему 2 у місце отвору 3 у скляній трубі 4 (рисунок 4.11, а), який імітував локальний дефект, гнучка трубка 5 з барабана герметичної камери була розмотана повністю. У момент повного розмотування прикріпленої до валу барабана гнучкої трубки відбулось гальмування прикріпленого до неї поршня і зупинка протягування ремонтної системи 2 (рисунок 4.11, а). Тоді ремонтна система 2 знаходилась у місці отвору 3 у скляній трубі 4. Суттєвого збільшення запоршневого тиску після різкого гальмування поршня 3, що могло б призвести до розривання гнучкої трубки 5, не відбувалось, оскільки поршень 3 є байпасним (має отвір вздовж своєї осі у який виходило повітря з запоршневого простору). Після зупинки поршня перекривали подачу повітря, знімали кришку герметичної камери і через проріз у диску барабана відкріплювали кінець гнучкої трубки від валу барабана. До відкріпленого від валу барабана кінця гнучкої трубки 5 було під'єднано трійник 6 з манометром 7, вентиль 8 та шланг 9 від компресора (рисунок 4.11, б). Тоді відкрито кран на виході компресора та вентиль 8 і повітря з ресивера компресора надходило в гнучку трубку 5. Через

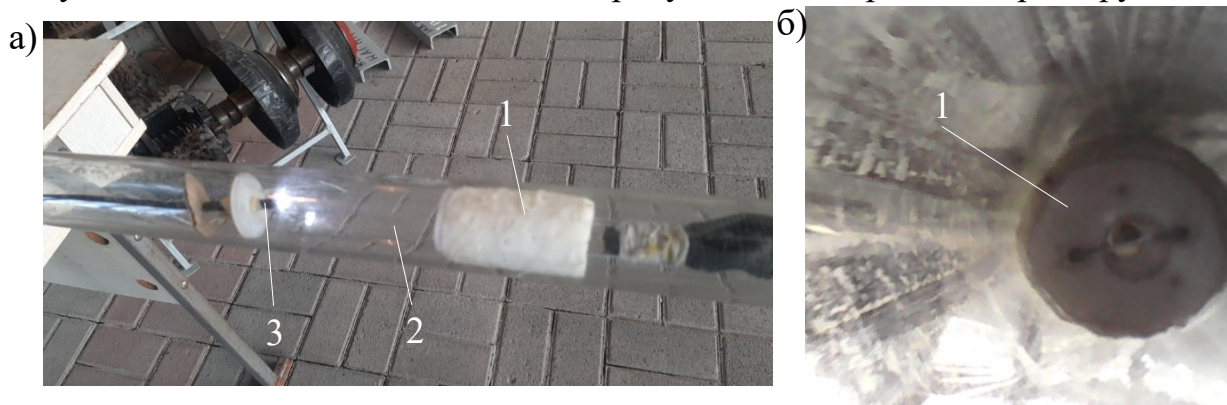


а) – доставлена до місця локального дефекту ремонтна система; б) – вузол подачі повітря в еластичну оболонку; в) – притиснутий до внутрішньої стінки трубопроводу ремонтний бандаж; 1 – поршень; 2 – ремонтна система; 3 – отвір; 4 – скляна труба; 5 – гнучка трубка; 6 – трійник; 7 – манометр; 8 – вентиль; 9 – малярна стрічка; 10 – ремонтний бандаж; 11 – поліетиленова плівка

Рисунок 4.11 – Встановлення ремонтного бандажа в місці локального дефекту

отвори в гнучкій трубці повітря поступало у еластичну оболонку, що призводило до збільшення в ній тиску і її роздування. У результаті малярні стрічки 9 розірвались і ремонтний бандаж 10 еластичною оболонкою щільно був притиснутий до внутрішньої стінки скляної труби 4 в місці отвору 3 (рисунок 4.11, в). Притиснутий ремонтний бандаж 10 витримували до тих пір, поки він міцно не приклеїться до внутрішньої стінки скляної труби 4. Для цього тиск у еластичній оболонці підтримували в діапазоні від 0,9 атм до 1,0 атм. Плавне регулювання тиску здійснювали вентилем 8, а вимірювання його величини манометром 7 (рисунок 4.11, б).

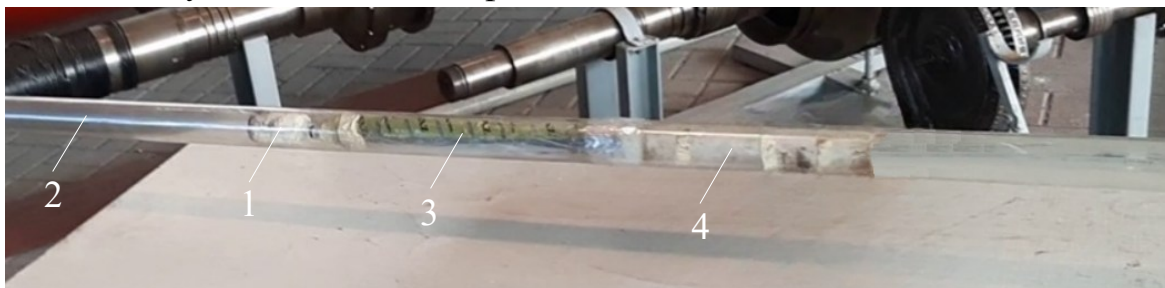
Для апробації процесу моніторингу і визначення місцезнаходження поршня 1 після його зупинки за локальним дефектом стінки труби у скляну трубу 2 із відкритого його торця проштовхували відеоендоскоп 3 (рисунок 4.12, а). Відеоендоскопом 3 визначено місцезнаходження поршня (рисунок 4.12, б), що дало змогу встановити на якій віддалі він перебуває від відкритого торця труби 2.



а) – проштовхування відеоендоскопа до поршня; б) – внутрішньотрубний фотознімок поршня; 1 – поршень; 2 – скляна труба; 3 – відеоендоскоп
Рисунок 4.12 – Внутрішньотрубний відеоконтроль місцезнаходження поршня

Після приклеювання ремонтного бандажа 10 до внутрішньої стінки скляної труби 4 в місці отвору 3 (рисунок 4.11, в) гнучку трубку 5 від'єднали від трійника 6 (рисунок 4.11, б) в результаті чого тиск у еластичній оболонці зменшився до атмосферного. Тоді кінець гнучкої трубки помістили в герметичну камеру, яку закрили кришкою. У результаті подавання компресором повітря в запоршневий простір поршень 1 почав рухатись скляною трубою 2 і витягувати за собою

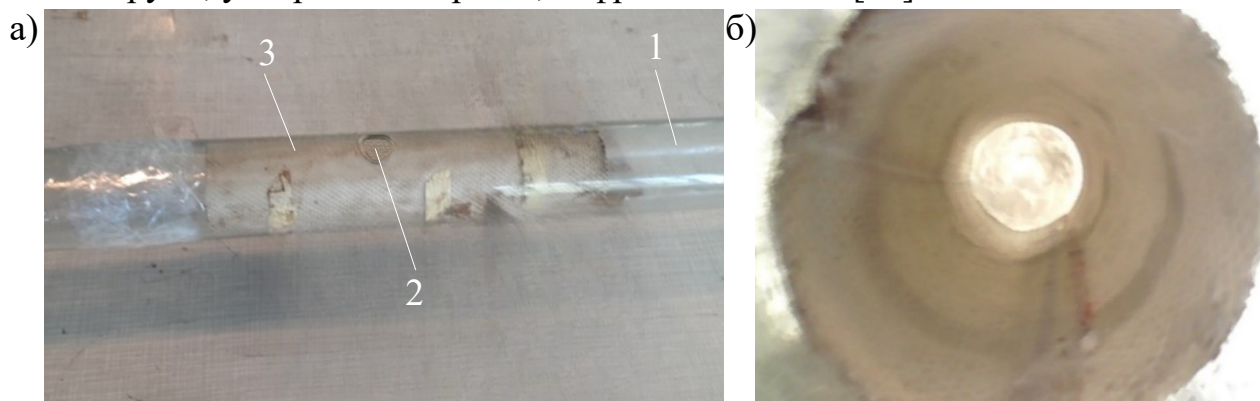
еластичну оболонку та поліетиленову плівку 3 (рисунок 4.13). Прилипання поліетиленової плівки 3 до ремонтного бандажу 4 не відбулось. Ремонтний бандаж 4 залишився приклеєним до внутрішньої стінки скляної труби 2 в місці отвору у її стінці, який імітував локальний дефект.



1 – поршень; 2 – скляна труба; 3 – поліетиленова плівка; 4 – ремонтний бандаж

Рисунок 4.13 – Видалення еластичної оболонки та поліетиленової плівки з трубопроводу

Після видалення еластичної оболонки та поліетиленової плівки з трубопроводу скляну трубу 1 заглушили (рисунок 4.14, а). Тоді щоб випробувати відремонтований трубопровід компресором подали повітря і в скляній трубі 1 створили тиск 1 атм. Повітря через отвір 2 в місці внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажу 3 не виходило. Після випробування відеоендоскопом виконано внутрішньотрубний відеоконтроль якості встановлення ремонтного бандажу. Відшарування ремонтного бандажу від внутрішньої стінки скляної труби, утворення зморшок, гофр не виявлено. [21]



а) – випробування внутрішнім тиском; б) – внутрішньотрубний фотознімок ремонтного бандажу; 1 – скляна труба; 2 – отвір; 3 – ремонтний бандаж

Рисунок 4.14 – Контроль якості внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажу

4.3 Промислова апробація технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж

Промислову апробацію розробленої технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів було проведено у реальних умовах експлуатації теплових мереж. Апробація здійснена на ділянці теплопроводу, яка має тривалий термін експлуатації, і прокладена від теплової камери ТК 427/46-18-3 до теплового пункту по вул. Героїв Маріуполя, 7А (м. Київ). Трубопровід має зовнішній діаметр 57 мм, номінальну товщину стінки 5 мм. Загальна довжина теплопроводу складає 53 м. Трубопровід містить два крутовигнуті відводи із кутом вигину 90° і радіусом вигину рівним DN. Перший знаходиться на відстані 17,9 м від ТК, а другий 41 м. На відстані 16,3 м за першим відводом, у важкодоступному місці під проїжджою частиною автомобільної дороги виявлено спричинений корозійними процесами дефект у вигляді плями довжиною 33 мм та шириною 11 мм. Оскільки місце корозійного дефекту є важкодоступне, тому саме ця ділянка трубопроводу була вибрана для виконання внутрішньотрубного локального ремонту і апробації розробленої технології в умовах реального об'єкта.

Поршень виготовлено із силіконового компаунда із діаметром наскрізного отвору рівним 10 мм. Діаметр поршня складає 47 мм, а його довжина 70 мм.

У якості ремонтного бандажа використовували безшовний рукав із круглого тканого текстилю довжиною 200 мм і діаметром 47 мм. Перед монтажем рукав просочували епоксидною термореактивною смолою, що забезпечувало формування міцного адгезійного з'єднання з внутрішньою поверхнею трубопроводу після його встановлення та витримування.

Під час опрацювання технологічної схеми ділянки теплопроводу встановлено, що конструктивні особливості теплової камери забезпечують можливість організувати під'єднання герметичної камери до трубопроводу. Також встановлено, що після виконання всіх операцій з внутрішньотрубного ремонту є технічна можливість безпечно вилучення поршня, не виконуючи земляних робіт.

Щоб визначити, чи здатний поршень пройти трубопровід перед початком ремонтних робіт виконано послідовне тестове запускання очисних поршнів із силіконового компаунда різної геометричної форми та жорсткості (прогресивна валідація) [108]. Очисні поршні запускали із ТК і вилучали в ТП. Таке запускання дало змогу встановити, що є можливість безпечного проходження циліндричного поршня усією довжиною ремонтваної ділянки трубопроводу. Виявлено, що перешкод, здатних ускладнити доставку ремонтного бандажу за крутовигнутий відвід трубопроводу немає.

Також було виконано дослідне протягування поршнем з осьовим отвором ремонтної системи вибраною ділянкою трубопроводу. Під час такого протягування поршень безперешкодно пройшов усю вибрану ділянку трубопроводу, а ремонтний бандаж залишився закріпленим на еластичній оболонці. Ознак, заклинювання, пошкодження поршня чи пошкодження або порушення ремонтного бандажу не зафіксовано. Під час руху системи трубопроводом зафіксовано два короточасних збільшення тиску. Перше до 0,085 МПа, а друге до 0,092 МПа. Встановлено, що збільшення тиску спричинене проходженням поршнем крутовигнутих відводів, які створюють найбільший опір руху на даній ділянці трубопроводу. Підвищення тиску було в межах допустимих значень, а тому підібраний компресор є спроможним забезпечувати рух поршня в реальних експлуатаційних умовах. Середня витрата повітря при цьому складала біля 0,07 м³/с. Протягування усією довжиною дефектної ділянки відбулося за 109 с. При цьому середня швидкість руху поршня складала 0,48 м/с.

Перед початком основних робіт проведено підготовку циліндричної герметичної камери, що входила до складу ремонтного оснащення. Усі необхідні операції мали стандартний технологічний характер і виконувалися швидко та без додаткових ускладнень (рисунок 3.45).

Спочатку здійснено підготовку циліндричної герметичної камери до виконання робіт (рисунок 4.15). Усі операції з підготовки технологічні і їх було легко виконувати.



Рисунок 4.15 – Підготовка циліндричної герметичної камери до виконання робіт

Наступним етапом поршень із осьовим отвором разом із ремонтною системою запасували у внутрішню порожнину трубопроводу, який містив дефект стінки у важкодоступному місці (рисунок 4.16). Конструкція вузлів під'єднання дала змогу без ускладнень стикувати герметичну камеру з теплопроводом, забезпечивши надійну герметизацію та готовність обладнання до виконання подальших операцій (рисунок 4.17).



Рисунок 4.16 – Запасування поршня у внутрішню порожнину теплопроводу



Рисунок 4.17 – З'єднання циліндричної герметичної камери з теплопроводом



Рисунок 4.18 – З'єднана з теплопроводом циліндрична герметична камера

Коли подали повітря від компресора в трубну катушку герметичної камери у запоршневому просторі почав збільшуватись тиск, що було зафіксоване манометром. Тиск збільшився до 0,023 МПа і стабілізувався, що засвідчило про початок процесу транспортування поршнем ремонтної системи до корозійного дефекту теплопроводу.

У міру руху поршня тиск на початку теплопроводу короткочасно підвищився до 0,069 МПа. Таке підвищення відповідало моменту проходження поршнем крутовигнутого відводу трубопроводу, найскладнішого для руху поршня місця. Після того коли поршень пройшов відвід тиск стабілізувався на рівні біля 0,026 МПа. Тоді через 29 секунд на манометрі відбулось різке збільшення тиску до понад 0,15 МПа. Це вказало на те, що поршень і ремонтна система досягли важкодоступного місця дефекту стінки трубопроводу. У цей момент подавання повітря припинили, що завершило етап доставки ремонтної системи. Середня витрата повітря впродовж доставки поршнем ремонтної системи становила наближено 0,08 м³/с.

Коли розгерметизували камеру пересвідчились, що поршень доставив ремонтну систему у необхідне місце, оскільки гнучка трубка була повністю розмотана з валу барабана. Тоді гнучку трубку від'єднали від валу барабана і приєднали до неї вузол регулювання тиску разом із шлангом від компресора. Тоді гнучкою трубкою подали повітря від компресора у еластичну оболонку і тиск у системі почав зростати. Величину тиску контролювали манометром вузла регулювання. Поступовим відкриванням вентиля тиск довели до 0,1 МПа. За такого тиску відбувається необхідне розширення еластичної оболонки і добре притискання ремонтного бандажа до внутрішньої поверхні трубопроводу.

Еластичну оболонку витримували під таким тиском протягом 2 години часу. Такого часу достатньо для повної полімеризації епоксидної термореактивної смоли та формування міцного адгезійного з'єднання ремонтного бандажа зі стінкою труби. Протягом усього періоду витримування тиск залишався стабільним і був рівним 0,1 МПа, що підтвердило герметичність системи та відсутність витоків повітря.

Коли було завершено етап витримування еластичної оболонки під робочим тиском гнучку трубку від'єднали від вузла регулювання. У результаті тиск у еластичній оболонці зменшився до атмосферного. Тоді гнучку трубку помістили всередину циліндричної герметичної камери.

Щоб вилучити поршень з еластичною оболонкою та гнучкою трубкою з трубопроводу компресором подали повітря в герметичну камеру. У результаті цього збільшився тиск на початку трубопроводу і розпочався рух поршня в напрямку ТП. Через 98 секунд поршень вийшов з теплопроводу в ТП. Разом із поршнем із трубопроводу було витягнуто еластичну оболонку з поліетиленовою плівкою без бандажа та гнучку трубки. При огляді поліетиленової плівки встановлено, що вона залишилася повністю неушкодженою, без ознак прилипання до встановленого всередині трубопроводу ремонтного бандажа. Це підтвердило, що після полімеризації термореактивної епоксидної смоли плівка не преклеювалась до бандажа.

Моніторинг точного місцезнаходження байпасного поршня після доставки ним ремонтної системи, а також оцінку якості встановлення ремонтного бандажа виконували за допомогою інспекційної відеокамери. Камеру проштовхували з протилежного кінця трубопроводу, а саме з ТП, що дало змогу отримати чітке візуальне зображення внутрішньої поверхні труби, перевірити правильність посадки бандажа, рівномірність його притиснення та відсутність зморшок, складок, зміщень або ознак неповного приклеювання (рисунк 4.19). Моніторинг підтвердив якісне виконання ремонтних робіт.

Промислова апробація підтвердила, що розроблена технологія локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок газових та теплових мереж протягуванням ремонтної системи поршнем є повністю працездатною та технологічно надійною. Поршень із осьовим отвором здатний забезпечити доставку ремонтної системи навіть у складних умовах теплопроводу у важкодоступне дефектне місце трубопроводу, зокрема за крутовигнутий відвід. Встановлено, що усі елементи обладнання та технічних засобів відзначаються високою технологічністю. Їх можна швидко підготувати до роботи, легко

змонтувати на об'єкті. Простота виконання технологічних операцій дає змогу застосовувати метод у виробничих умовах без потреби у складних підготовчих роботах або залученні спеціальної важкої техніки.

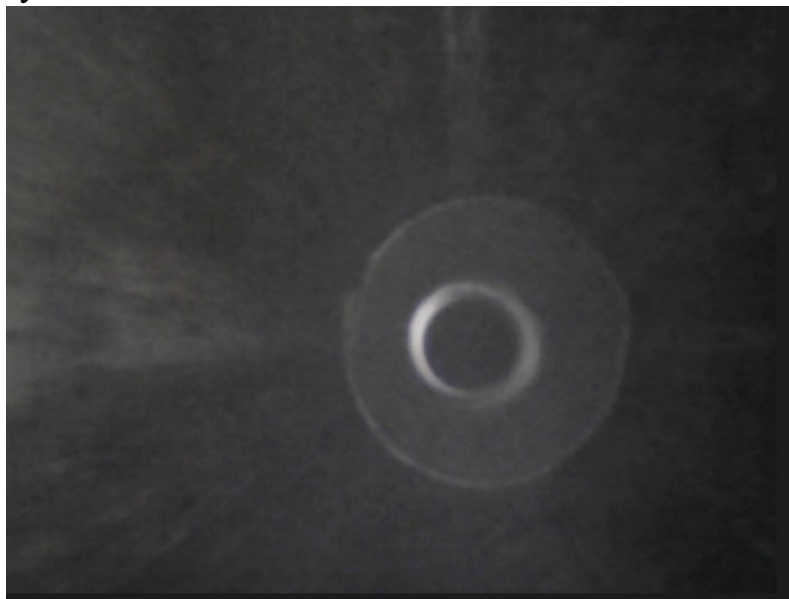


Рисунок 4.19 – Внутрішньотрубно встановлений бандаж у важкодоступному місці дефекту стінки труби теплопроводу

Результати промислової апробації свідчать, що впровадження цієї технології у практику дає змогу підвищити загальну надійність трубопровідних систем, мінімізувати втрати теплоносія чи газу. Крім того, використання внутрішньотрубного методу усуває потребу у розкритті ґрунту та порушенні благоустрою, що особливо важливо для ділянок, прокладених у важкодоступних місцях, зокрема під автомобільними дорогами. Застосування технології сприяє збереженню міської інфраструктури та економії ресурсів, необхідних для традиційних ремонтів з розкопуванням теплопроводу.

За результатами експериментальних досліджень, промислової апробації розроблено технологічну інструкцію з внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів (додаток Б).

Розроблена техніка та технологію внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень^Б” впроваджено у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ” (додаток В).

Незважаючи на те, що розроблена техніка та технологія внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів пройшла промислову апробацію в умовах теплових мереж, її також можна застосовувати для сталевих газових мереж будь-якого тиску, оскільки доставка ремонтної системи до важкодоступної ділянки здійснюється не під робочим тиском мережі, а тиском компресора.

Розроблену технологію внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів доцільно застосовувати за умови, коли віддаль між місцем розгерметизації трубопроводу (монтажу герметичної камери) та місцем дефекту не перевищує 100 м, оскільки за значної довжини гнучкої полівінілхлоридної трубки істотно зростають її залишкові видовження після гальмування поршня з осьовим отвором безпосередньо за місцем локального дефекту трубопроводу, що значно ускладнює точне позиціювання ремонтної системи. Крім того розроблену технологію доцільно застосовувати для трубопроводів газорозподільних і теплових мереж із зовнішнім діаметром від 57 мм до 114 мм, що є найбільш поширеними в зазначених трубопровідних системах.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розроблено технологію внутрішньотрубного локального ремонту трубопровідних мереж “Тяговий поршень^Б”, яка полягає у протягуванні циліндричним поршнем з осьовим отвором із силіконового компаунда ремонтної системи до місця локального спричиненого корозійними процесами дефекту трубопроводу газової або теплової мережі. Щоб поршень зупинився, коли він доставить ремонтну систему у важкодоступне місце трубопроводу, де є локальний дефект стінки труби, до нього прикріплена гнучка трубка протилежний кінець якої міцно закріплений до валу барабана з якого вона розмотується. Також нею подають повітря у еластичну оболонку за рахунок чого вона роздувається і притискає просякнутий епоксидною смолою ремонтний бандаж до внутрішньої стінки в місці локального дефекту, що забезпечує його адгезію.

2. Виконано серію експериментальних випробувань розробленої технології “Тяговий поршень^Б”. Експериментально підтверджено можливість доставки байпасним поршнем ремонтної системи у важкодоступне дефектне місце трубопроводу, за відвід, трійник, та встановлення в ньому ремонтного бандажа. Результати випробувань засвідчили про герметичність трубопроводу в місці виконаного локального внутрішньотрубного ремонту, а моніторинг відеоконтролем показав відсутність будь-яких дефектів, таких як відшарування ремонтного бандажа від внутрішньої стінки, утворення зморшок чи гофр.

3. Розроблена технологія “Тяговий поршень^Б” промислово апробована в умовах теплової мережі. Трубопровід містив два крутовигнутих відводи. Перший був на ділянці від початкової точки до місця локального дефекту стінки труби. Промислова апробація засвідчила, що розроблена технологія “Тяговий поршень^Б” є працездатною, технологічною і придатною до застосування у реальних експлуатаційних умовах. Усі етапи підготовки та виконання робіт від тестування прохідності теплопроводу, доставки ремонтної системи до місця дефекту, встановлення бандажа до вилучення поршня виконані без ускладнень. Таким чином, промислова апробація підтвердила, що впровадження цієї технології у практику операторів газових і теплових мереж сприятиме підвищенню їх надійності, зменшенню втрат енергоносіїв, подовженню ресурсу трубопроводів та оптимізації витрат на їх ремонт в умовах сучасної міської інфраструктури.

4. Технічним результатом застосування розробленої технології “Тяговий поршень^Б” є забезпечення можливості застосування в важкодоступному місці трубопроводу, зокрема за трійником, крутовигнутим відводом, зниження витрат на ремонтні роботи, незначний обсяг або відсутність земляних робіт, мінімізація часу простою трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах і зменшення впливу ремонтних робіт на довкілля, інфраструктуру та благоустрій.

За результатами виконаних досліджень розроблено технологічну інструкцію з внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів.

Технологія “Тяговий поршень^Б” промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

Основні результати третього розділу опубліковано в працях [21, 25].

ВИСНОВКИ

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень процесу протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи у важкодоступне місце трубопроводу, газодинамічних процесів у внутрішній порожнині сталевому трубопроводу під час виконання таких робіт вирішено важливу науково-технічну задачу внутрішньотрубного ремонту локальних важкодоступних дефектів трубопроводів газових і теплових мереж.

1. На базі досліджень динаміки протягування поршнем із осьовим отвором ремонтної системи сталевим трубопроводом встановлено, що ідею локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступної ділянки трубопроводу можливо реалізувати, оскільки, для виконання таких робіт потрібні незначні тягові зусилля і відповідно незначний тиск на виході компресора, а міцність гнучкої трубки забезпечується. Так, для протягування поршнем ремонтної системи трубопроводом зовнішнім діаметром 57 мм, який містить крутовигнутий відвід на довжину до 15 м потрібен тиск до 0,2 МПа. Визначено, що сила тертя між ремонтною системою та сталеву трубою є невеликою і знаходиться в межах від 100 Н до 200 Н, тому поршнем із осьовим отвором можна доставити ремонтну систему у віддалене важкодоступне місце локального дефекту трубопроводів газових і теплових мереж. Для великих довжин гнучкої трубки потрібна корекція позиції, оскільки при її довжині 100 мм залишкові деформації після зупинки поршня за місцем локального дефекту складають 75 мм.

2. CFD моделювання газодинамічних процесів, які відбуваються у трубопроводі під час доставки поршнем із осьовим отвором ремонтної системи у важкодоступне місце встановлено, що діаметр осьового отвору поршня є визначальним фактором, що впливає на величину перепаду тиску на ньому, рушійну силу та відповідно тягове зусилля з яким він протягує ремонтну систему. Коли поршень перебуває на прямолінійній ділянці трубопроводу у разі збільшенні діаметра осьового отвору в ньому від 6 мм до 10 мм величина рушійної сили зменшується від 170,8 Н до 39,7 Н, тоді як подальше збільшення діаметра осьового

отвору до 14 мм зменшує її до рівня 6,6 Н. Найрізкіше зменшення спостерігається в діапазоні малих діаметрів від 6 мм до 10,5 мм, тоді як подальше збільшення діаметра осьового отвору в поршні понад 10,5 мм призводить до поступового вирівнювання кривої та незначного зменшення рушійної сили. Такі тенденції однакові як для випадків перебування поршня у прямолінійних ділянках, так і у крутовигнутих відводах трубопроводу, проте у відводах величини перепаду тиску на поршні і відповідно рушійної сили є істотно більшими внаслідок додаткових локальних гідравлічних втрат та посилення турбулентності.

3. Результати виконаних досліджень свідчать, що за значних діаметрів осьового отвору в поршні (більше 10,5 мм) величина рушійної сили, яка діє на нього, є недостатньою для забезпечення його стабільного руху трубопроводом, що істотно знижує здатність долати крутовигнуті відводи та доставляти ремонтні елементи у важкодоступні місця трубопроводів. Зокрема, за діаметра осьового отвору 14 мм зафіксовано застрягання поршня у крутовигнутому відводі експериментальної установки. Водночас, зменшення діаметра осьового отвору призводить до істотного зростання навантаження на гнучку трубку, коли поршень зупинився безпосередньо за місцем локального дефекту стінки, до припинення подавання повітря компресором. Так, при діаметрі осьового отвору 6 мм величина розтягувальної сили, що виникає в гнучкій трубці, сягає 170,8 Н, що створює високий ризик її пошкодження або навіть руйнування. При цьому аналітично встановлено, що мінімальне допустиме значення діаметра осьового отвору у поршні, при якому зберігається цілісність конструкції, становить 5 мм.

4. Розроблено технологію внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж протягуванням поршнем у сталевий трубопровід ремонтної системи – “Тяговий поршень^Б” технічним результатом застосування якої є можливість виконання ремонтних робіт у важкодоступному місці трубопроводу, зокрема за трійником, крутовигнутим відводом, зниження витрат на ремонтні роботи, незначний обсяг або відсутність земляних робіт, мінімізація часу простою трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах і зменшення впливу ремонтних робіт

на довкілля, інфраструктуру та благоустрій. За результатами виконаних досліджень розроблено технологічну інструкцію з внутрішньотрубного ремонту важкодоступних дефектних ділянок трубопроводів. Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів газових і теплових мереж – “Тяговий поршень^Б” промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Najafi M., Gokhale S. Trenchless Technology Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal. Second Edition. New York, N.Y.: McGraw-Hill Education. 2021. 589 p.
2. Serajiantehrani R., Najafi M., Mohammadi M., Kaushal V., Korky S. Construction Cost Analysis of Trenchless Cured-in-place Pipe and Spray-applied Pipe Linings Rehabilitation Methods in Gravity Conveyance Conduits. *Pipelines 2021: Construction and Rehabilitation*. 2021. P. 210-220.
3. Guideline for Pipe Bursting. The International Pipe Bursting Association (IPBA). 2012. 29 p.
4. Wróbel G., Pusz A., Szymiczek M., Michalik K. Swagelining as a method of trenchless pipelines rehabilitation. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. 2009. № 33 (1). P. 27-34.
5. Engineering design guide for rehabilitation with cured-in-place pipe. Second Edition. Lanzo Lining Services, Inc. 2010. 47 p.
6. Trenchless Rehabilitation For Pressure Pipes. European Training Programme. 7 p.
7. Chuk C., Urgessa G., Thippeswamy H. Numerical analysis of stresses for cured-in-place-pipe linings. *WIT Transactions on The Built Environment*. 2011. Vol. 115. P. 283-293. DOI: 10.2495/FSI110241
8. ASCE Manual of Practice for Pipe Bursting Projects. American Society of Civil Engineers 1801 Alexander Bell Drive Reston, VA 20191. 82 p.
9. Grundoburst static pipe bursting systems the renovators. 2025. 28 p.
10. Pipe Bursting. (2025). Retrieved from: <https://www.lowatschek-regner.at/equipment/hammerhead/pipe-bursting>.
11. Doroshenko Y., Zapukhliak V., Poliarush K., Stasiuk R., Bagriy S. Development of trenchless technology of reconstruction of "pulling pig P" pipeline communications. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2 (1). P. 28-38. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164351

12. Дорошенко Я. В. Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопровідних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1(33). С. 36–46. DOI: 10.31471/1993-9868-2020-1(33)-36-46

13. Marcino S. Structural Lining for Water Mains. *PA-AWWA 67th Annual Conference*. 21-23 April 2015, Hershey, PA. P. 1-22.

14. Дорошенко Я. В., Стецюк С. М., Бондаренко Р. В., Данів З. В. Технології безтраншейної реновації трубопровідних систем. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2023. 2(87). С. 17-32. DOI: 10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32.

15. Бондаренко Р. В., Данів З. В. Технології внутрішньотрубного відновлення трубопроводів. Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених (Чернігів, 21 квітня 2023 р.). Чернігів, 2023. С.14-15.

16. Bondarenko R., Doroshenko Y. Numerical-experimental analysis of the process of delivering a repair system by a bypass pig to a hard-to-reach place of the pipeline. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2025. 130(1). P. 14-28. DOI: 10.5604/01.3001.0055.2799.

17. Stetsiuk S., Doroshenko Y., Bondarenko R., Filipchuk O., Volovetskyi V. Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024. 123. P. 303-317. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.123.15.

18. Volovetskyi V. B., Doroshenko Ya. V., Bugai A. O., Kogut G. M., Raiter P. M., Femiak Y. M., Bondarenko R. V. Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022. 111(2). P. 64-77. DOI: 10.5604/01.3001.0015.9996.

19. Shatskyi I., Makoviicuk M., Bondarenko R., Doroshenko Y. On the estimates of the strength of a damaged pipeline restored by patching [VIII International conference. “In-service damage of materials, its diagnostics and prediction” "DMDP"], (Ternopil, 15-17 october 2025 y.). Ternopil, 2025. P. 1-4.

20. Stetsiuk S., Bondarenko R., Doroshenko Y., Holubenko V. Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. 74(1). P. 9-24. DOI: 10.2478/scjme-2024-0002.

21. Дорошенко Я. В., Бондаренко Р. В., Запухляк В. Б., Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Розроблення технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводних мереж. *Нафтогазова енергетика*. 2024. 2(42). С. 71-84. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-71-84.

22. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В., Бондаренко Р. В., Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу геометричної форми та матеріалу поршнів на ефективність очищення трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 4(89). С. 26-43. DOI: 10.69628/pdogf/4.2023.26.

23. Дорошенко Я., Бондаренко Р. Експериментальні дослідження динаміки протягування байпасним поршем ремонтних систем у важкодоступні дефектні місця трубопроводів. *Проблеми та перспективи транспортування та зберігання енергоносіїв*. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ – Яремче, 3-4 липня 2025 р.). Івано-Франківськ, 2025. С. 112-113. DOI: 10.31471/pptzen2025.

24. Дорошенко Я. В., Бондаренко Р. В., Григорський С. Я., Маркевич М. В. Експериментальні дослідження динаміки протягування ремонтної системи байпасним поршем для виконання внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводних мереж. *Освіта і наука в Україні в період глобальних викликів сьогодення*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 28 листопада 2024 р.). Київ, 2024. С. 149-152. DOI: 10.51587/9786-1773-89322-2024-16.

25. Дорошенко Я. В., Бондаренко Р. В., Іванов О. В., Маркевич М. В. Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту трубопроводних мереж для запобігання втрат енергоносіїв. *Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. Матеріали VIII Міжнародного конгресу (Львів, 16-18 жовтня 2024 р.). Львів, 2024. С. 165.

26. Поляруш Костянтин Анатолійович Розроблення техніки та технології безтраншейної реконструкції трубопроводів газових і теплових мереж : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" : Дата захисту 22.09.20 / К. А. Поляруш. - Івано-Франківськ, 2019. - 169 с.

27. Чим закінчиться редизайн газових мереж і для чого це потрібно Україні? (2021). Retrieved from: https://glavcom.ua/new_energy/publications/chim-zakinchtsya-redizayn-gazovih-merezh-i-dlya-chogo-ce-potribno-ukrajini-765598.html.

28. Зберегти блакитний вогник. Чого навчила війна українських газівників? (2022). Retrieved from: <https://glavcom.ua/economics/finances/zberegti-blakitniy-vognik-chogo-navchila-viyna-ukrajinskih-gazivnikiv-848724.html>.

29. Навіщо Україні редизайн газових мереж і до чого тут водень? (2021). Retrieved from: <https://epravda.com.ua/projects/greendead/2021/06/15/674782/>.

30. Правила технічної експлуатації систем газопостачання. Затверджено Наказом Міністерства енергетики України від 21 жовтня 2024 року № 402. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 29 листопада 2024 року № 1816/43161.

31. АТ "Рівнегаз" завершує підготовку 10,2 тисяч км газових мереж і обладнання до нового опалювального сезону. (2021). Retrieved from: <https://interfax.com.ua/news/press-release/772890.html>.

32. Корозія прибудинкових газових мереж під дією змінного струму. ELARTU — Інституційний репозитарій ТНТУ імені Івана Пулюя Матеріали конференцій, семінарів, читань 2017 V Міжнародна науково-технічна конференція „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“ (2017).

33. Управління змістом проектів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж : монографія / Г. С. Ратушняк, О. І. Ободянська. – Вінниця, 2014. – 130 с

34. Огляд ринку централізованого тепlopостачання України. (2014). Retrieved from: https://aea.org.ua/2014/05/oglyad-rinku-tsentralizovanogo-teplopostachannya-ukrayini/?utm_source=chatgpt.com.

35. У Києві планується провести аерозйомку для визначення рівня тепловтрат у мережах. (2015). Retrieved from: <https://salo.li/Ef8f886>.

36. У Києві щодоби усувають майже 40 пошкоджень теплових мереж. (2015). Retrieved from: <https://bigkyiv.com.ua/u-kyievi-shhodoby-usuvayut-majzhe-40-poshkodzhen-teplovyyh-merezh/>.

37. Тепломережі Києва на межі: експерт пояснив, чому у людей будуть холодні батареї взимку. (2024). Retrieved from: <https://112.ua/teplomerezi-kieva-na-mezi-ekspert-poasniv-comu-u-ludej-budut-holodni-batarei-vzimku-42161>.

38. Динаміка розвитку й сучасний стан системи теплопостачання м. Києва. (2003). Retrieved from: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/56-entsiklopediya/rozvitok-teploenergetiki-ta-gidroenergetiki/chasina-1-teploenergetika/rozdil-5-tsentralizovane-teplopostachannya-velikikh-mist/156-5-1-dinamika-rozvitku-j-suchasnij-stan-sistemi-teplopostachannya-m-kieva>.

39. Комунальники розповіли про аварійний стан тепломереж Києва. (2020). Retrieved from: <https://www.pravda.com.ua/news/2020/01/14/7237341/>.

40. У Києві протестували на міцність понад 80% теплових мереж у межах підготовки до опалювального сезону. (2025). Retrieved from: <https://kte.kmda.gov.ua/u-kyievi-protestuvaly-na-mitsnist-ponad-80-teplovyyh-merezh-u-mezhah-pidgotovky-do-opalyuvalnogo-sezonu/>.

41. У Києві створили карту ремонту теплових мереж. (2024). Retrieved from: <https://kte.kmda.gov.ua/u-kyievi-stvoryly-kartu-remontu-teplovyyh-merezh/>.

42. Інвестиційна програма Комунальне підприємство «Харківські теплові мережі» на 2021 р. у сфері теплопостачання. URL: https://hts.kharkov.ua/docs/proekt_2021.pdf

43. Теплозабезпечення великих міст України: поточний стан і напрями модернізації : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима, Є. І. Котлярова; авт. кол. : Кизим М. О., Котляров Є. І., Хаустова В. Є., Салашенко Т. І., Красноносова О. М., Костенко Д. М., Крячко Є. М., Пономаренко Є. В., Рудика О. В., Хаустов М. М. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2021. 340 с.

44. Trenchless Technology. (2023). Retrieved from: <https://lamstt.org/en/trenchless-technology>.
45. Internal Pipe Cleaning Equipment. (1996-2023). Retrieved from: <https://www.indiamart.com/proddetail/internal-pipe-cleaning-equipment-9885610212.html>.
46. 4 Key Benefits of Robotic Abrasive Blasting. (2015). Retrieved from: <https://blog.spongejet.com/4-key-benefits-of-robotic-abrasive-blasting>.
47. Video Sewer Inspections across Chicagoland. (2023). Retrieved from: <https://americantrenchlesstechnologies.com/video-sewer-inspections/>.
48. Hicks, J., Kaushal, V., & Jamali, K. (2022). A Comparative Review of Trenchless Cured-in-Place Pipe (CIPP) With Spray Applied Pipe Lining (SAPL) Renewal Methods for Pipelines. *Water*, 4, 1-7. DOI: 10.3389/frwa.2022.904821.
49. Lichtbuer, G. (2016). *Integrated cost comparative framework for trenched and trenchless techniques in the Netherlands*. (Master's Thesis Internship, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein, Netherlands)
50. Дорошенко, Я. В. (2009) Спорудження магістральних трубопроводів. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.
51. Pipecoater. (n.d.). Retrieved from: <https://airblastaustralia.com/product/pipecoater-iii300-for-5-12-id-pipes/>.
52. Pipe Coating Services. (2020). Retrieved from: <https://m.indiamart.com/proddetail/pipe-coating-services-2851014554197.html>.
53. Bueno, M. (2014). Pipe relining continues to thrive and grow. *Trenchless technology*. Special supplement, 2014, P. 6.
54. Поляруш К.А., Дорошенко Я.В., Тихонов С.І., Бабій А.Р. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1 (58). С. 41-51.
55. Тихонов С.І., Дорошенко Я.В., Поляруш К.А. Технології внутрішньотрубного обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2015. № 1 (38). С. 83-94.

56. Lee, L., Estrada, H., & Baumert, M. (2010). Time-dependent reliability analysis of FRP rehabilitated pipes. *Journal of Composites for Construction*. 2010. 14(13). P. 272-279. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000075.

57. Руднева І., Прядко Ю., Прядко М., Тонкачєв Г. Особливості та перспективи використання технологій підсилення будівельних конструкцій композиційними матеріалами при реконструкції споруд. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020. № 07. С. 12-22. DOI: 10.32347/2522-4182.7.2020.

58. Soldati, S. Trenchless pressure pipe rehabilitation. In 2021 Facers Annual Meeting: Materials of the annual conference. 2021. P. 1-37. Florida: Florida Association of Counties

59. Mifek, R. Rehabilitation of Sewerage System Structures. In *9th technical conference for doctoral study: Materials of the scientific conference with international participation*. 2007. P. 231-232.

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

61. Project of the Year Rehabilitation Runner, 2020.

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

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

64. The Best Trenchless Sewer Pipe Repair in Atlanta. (n.d.). Retrieved from: <https://northgeorgiapipelining.com/services/trenchless-sewer-repair-atlanta-ga/>

65. Modricker, O. Determining trenchless renewal options using CCTV information. Gipenz: ProjectMax Ltd. The Safety of CIPP. (2023). Retrieved from: <https://trenchlesstechnology.com/the-safety-of-cipp/>.

66. Timberlake, M. The pipe that came in from the cold. *Trenchless Word*, July/August. 2015. P. 14-15.

67. Rehabilitación de tuberías. (2023). Retrieved from: <https://www.limpiezasjavea.com/en/sistema-packer-de-reparacion-de-tuberias-sin-obra/>

68. PipePatch now offers Elbow Repairs. (n.d.). Retrieved from: <https://www.s1eonline.com/articles/2013/06/17/source-1-environmentals-pipepatch-recognized-icc-es>.

69. Tomczak, E., & Zielińska, A. Example of sewerage system rehabilitation using trenchless technology. *ECOL CHEM ENG S.*, 2017. 24(3). 405-416. DOI: 10.1515/eces-2017-0027

70. TYGERPatch PipePatch Tee & Wye Lateral Seal. (2022). Retrieved from: <https://www.s1eonline.com/pipepatch/product-line/tee-wye-pipepatch-lateral-seal-system>.

71. TYGERPatch Tall Lid PipePatch System. (2021). Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=fo96flop1qo>

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

73. Timberlake M. The pipe that came in from the cold. *Trenchless Word*. 2015. July/August. P. 14-15.

74. Rush, J. Trenchless Pipe Relining Continues to Thrive. *Trenchless technology*, Special supplement. 2014. P. 8-10.

75. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запухляк В. Б. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій очисним поршнем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3. С. 12-18. DOI: 10.31471/1993-9973-2018-2(67)-12-18.

76. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., Запухляк В. Б. Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією "Тяговий поршень^Т". *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 1. С. 25-32. DOI: 10.31471/1993-9973-2019-1(70)-25-32.

77. Дорошенко Я. В. Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопровідних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 36–46. DOI: 10.31471/1993-9868-2020-1(33)-36-46.

78. Дорошенко, Ярослав Васильович Наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" : Дата захисту 22.12.20 / Я. В. Дорошенко. - Івано-Франківськ, 2020. - 405 с. : іл., рис., табл. - 330-360.

79. Стецюк С. М. Експериментальні дослідження ефективності очищення внутрішньої порожнини трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів. *Нафтогазова енергетика*. 2022. № 2(38). С. 62–75. DOI: 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-62-75.

80. Стецюк, Сергій Михайлович Розвиток наукових основ очищення промислових трубопроводів поршневыми засобами : дис. ... д-ра. техн. наук : спец. 05.15.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" / С. М. Стецюк. - Івано-Франківськ, 2025. - 403 с.

81. Stetsiuk S. M. Experimental investigation of the movement patterns and deformation of the pigs when passing through a pipe elbow and reducer / S. M. Stetsiuk, Ya. V. Doroshenko, Yu. I. Doroshenko, O. O. Filipchuk, V. Ya. Grudz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2024. Vol. 124, Issue 2. P. 49–64. DOI: 10.5604/01.3001.0054.7759.

82. Stetsiuk S. M. Numerical and laboratory experimental analysis of the movement of silicone cleaning pigs through 90-degree bends pipe / S. M. Stetsiuk, Ya. V. Doroshenko, O. O. Filipchuk, Z. V. Daniv, V. B. Volovetskyi // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 126, Issue 2. P. 65–77. DOI: 10.5604/01.3001.0054.6831.

83. Stetsiuk S. Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation / S. Stetsiuk, Y. Doroshenko, R. Bondarenko, O. Filipchuk, V. Volovetskyi // *Scientific Journal of*

Silesian University of Technology. Series Transport. 2024. Vol. 123. P. 303–317. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.123.15.

84. Стецюк С. М. Експериментальні дослідження динаміки руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів відводами і перехідниками трубопроводів *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 4(85). С. 28–42. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-4(85)-28-42.

85. Стецюк С. М. Деформації та закономірності руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів рівнопрохідними трійниками трубопроводів // *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 2(42). С. 17–29. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-17-29.

86. S.M. Stetsiuk, I.P. Shatskyi, Ya.V. Doroshenko, A.S. Velychkovych, Analytical study of frictional interaction of elastic cleaning pig with pipeline wall, *Archives of Materials Science and Engineering* 129/2 (2024) 67-76. DOI: 10.5604/01.3001.0054.9194.

87. L. Zhang, J. Zhou, H. He, Modeling and simulation of pigging for a gas pipeline using a bypass pig, *Mathematical Problems in Engineering* 2020 (2020) 1-12. DOI: 10.1155/2020/2047352.

88. H. Zhang, S. Zhang, S. Liu, X. Zhu, B. Tang, Chatter vibration phenomenon of pipeline inspection gauges (PIGs) in natural gas pipeline, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27/2 (2015) 1129-1140. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.09.054.

89. Попадюк І. Й., Шацький І. П., Шопа В. М. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 183 с.

90. Shopa V. M., Shatskyi I. P., Bedzir O. O. Velychkovych A. S. Contact Interaction of Cut Shells with Deformable Bodies. – Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2015. – 208 p.

91 Шацький І., Величкович А. Аналітична модель структурного демпфування в модулі тертя оболонкового амортизатора, з'єданого з пружиною. *Удари та вібрації*. 2023 (2023) С. 4140583.

92 Шацький І. П. Закриття поздовжньої тріщини в пологій циліндричній оболонці при згинанні. *Матеріалознавство*. 2005. Vol. 41. P. 186–191.

93 Попадюк І.Й., Шацький І.П., Шоп В.М., Величкович А.С. Фрикційна взаємодія циліндричної оболонки з деформованим наповнювачем при немонотонному навантаженні. *Journal of Mathematical Sciences*. 2016. Vol. 215. P. 243–253.

94. Doroshenko Ya., Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No 8 (103). P. 28–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.192828.

95. Дорошенко Я. В. CFD-дослідження газодинамічних процесів у зварних трійниках магістральних газопроводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2020. Том 31 (70), № 1. Частина 2. С. 27–33. DOI: 10.32838/2663-5941/2020.1-2/06.

96. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, В. Б. Запихляк, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запихляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 5 (29). С. 25–29.

97. Дорошенко Я. В., Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник*. 2016. № 1 (40). С. 57–71.

98. Shatskii I. P. Crack problem for a shallow shell with a flexible coating. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 1996. Vol. 37. P. 259–265.

99. Shats'kyi I., Makoviichuk M., Shcherbii A. Influence of a flexible coating on the strength of a shallow cylindrical shell with longitudinal crack. *Journal of Mathematical Sciences*. 2019. Vol. 238. P. 165–173.

100. Shatskyi I. P., Makoviichuk M. V., Shcherbii A. B. Equilibrium of cracked shell with flexible coating. *In: Shell Structures: Theory and Applications*. 2018. Vol. 4. P. 165–168. DOI: 10.1201/9781315166605-34.

101. Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів: Підручник / За ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і переробл. – Київ: Вища школа, 2004. – 655 с.

102. Folias E. S. An axial crack in a pressurized cylindrical shell. *Int. J. Fract.* 1984. Vol. 26. P. 251–260.

103. Експериментальні дослідження динаміки руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів фасонними елементами трубопроводів / Я. В. Дорошенко, С. М. Стецюк, О. В. Іванов, О. О. Філіпчук // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2024): матеріали тез доповідей XIV Міжнар. науково-практичної конф., м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р. Чернігів, 2024. Т. 2. С. 207–208.

104. Дорошенко Я. В., Стецюк С. М., Філіпчук О. О. Дослідження впливу геометричної форми поршнів на ефективність очищення трубопроводів. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM 2024: матеріали Міжнар. наук.-технічн. конф., м. Дніпро, 10–11 квітня 2024 р. Дніпро, 2024. С. 358–362.

105. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В. Розроблення технологій очищення внутрішньої порожнини трубопроводів систем збору газу газових родовищ для запобігання викидів парникових газів в атмосферу. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: зб. матер. IX Міжнар. молодіжного конгресу, м. Львів, 28–29 березня 2024 р. Київ, 2024. С. 33.

106. Стецюк С. М. Дослідження динаміки руху очисних поршнів шлейфами свердловин газових родовищ. Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі: збірн. тез доповідей II Міжнародної науково-практичній конф. молодих учених, м. Чернігів, 21 квітня 2023 р. Чернігів, 2023. С. 43–45.

107. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В. Експериментальне визначення ефективності застосування поршнів із гіперпружних матеріалів для очищення трубопроводів. Modern methods of solving scientific problems of reality: proceedings

of XXXV Inter. scientific and practical conf., c. Varna, 05–08 september 2023 y. Varna, Bulgaria, 2023. P. 178–180.

108. Дорошенко Я., Стецюк С. Розроблення технологічної послідовності валідації очисного поршня для трубопровідних систем збору та підготовки газу газових родовищ, мереж газо- і теплопостачання. Сталий розвиток: виклики та реалії здійснення (Україна-світ): збірн. матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конф. здобувачів і молодих вчених, м. Івано-Франківськ, 22 травня 2024 р. Івано-Франківськ, 2024. С. 10–12.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опублікуванні основні результати дисертації

1. **Bondarenko R.**, Doroshenko Y. Numerical-experimental analysis of the process of delivering a repair system by a bypass pig to a hard-to-reach place of the pipeline. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2025. 130(1). P. 14-28. DOI: 10.5604/01.3001.0055.2799. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав CFD моделювання газодинамічних процесів, які відбувається у трубопроводі під час протягування поршнем з різним діаметром осьового отвору в ньому ремонтної системи його прямолінійними ділянками та відводом. Брав участь у розробленні технології та виготовленні поршнів з наскрізним осьовим отвором, лабораторних експериментальних дослідженнях протягування ними ремонтної системи трубопроводом, який містить крутовигнутий відвід. Встановив закономірності впливу діаметра осьового отвору в поршні на перепад тиску і діючу на нього рушійну силу. Брав участь у підготовці статті до публікації.

2. Stetsiuk S., **Bondarenko R.**, Doroshenko Y., Holubenko V. Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. 74(1). P. 9-24. DOI: 10.2478/scjme-2024-0002. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – брав участь у розробленні технології виготовлення та виготовленні дослідних зразків циліндричних поршнів, розробленні експериментальних установок та експериментальних дослідженнях динаміки руху поршнів трійниками трубопроводів, опрацюванні та аналізі результатів експериментальних досліджень. Брав участь у підготовці статті до публікації.

3. Stetsiuk S., Doroshenko Y., **Bondarenko R.**, Filipchuk O., Volovetskyi V. Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation. *Scientific Journal of Silesian University of*

Technology. Series Transport. 2024. 123. P. 303-317. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.123.15. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав аналіз сил, які діють на поршень під час його руху відводом трубопроводу та записав рівняння руху поршня. Сформував рекомендації щодо підбору матеріалу, довжини та швидкості руху циліндричного поршня із гіперпружного матеріалу, щоб він був здатний проходити крутовигнуті відводи трубопроводу без зупинки та застрягання. Брав участь у підготовці статті до публікації.

4. Volovetskyi V. B., Doroshenko Ya. V., Bugai A. O., Kogut G. M., Raiter P. M., Femiak Y. M., **Bondarenko R. V.** Developing measures to eliminate of hydrate formation in underground gas storages. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2022. 111(2). P. 64-77. DOI: 10.5604/01.3001.0015.9996. **Індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus.** Особистий внесок – виконав CFD моделюванням газових потоків в трубопроводі в місці можливого утворення гідратів, які можуть бути перешкодою руху поршнів, встановив закономірності розподілу швидкості, тиску і об'ємної частки рідкої фази в цих місцях. Брав участь у підготовці статті до публікації.

5. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Запухляк В. Б., Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Розроблення технології локального внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж. *Нафтогазова енергетика.* 2024. 2(42). С. 71-84. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-71-84. **Наукове фахове видання України.** Особистий внесок – запропонував ідею, брав участь у розробленні технології доставки трубопроводом ремонтної системи поршнем з осьовим отвором до локального дефекту стінки труби у важкодоступне місце, за крутовигнутий відвід або трійник, і встановленні там ремонтного бандажа. Брав участь у розробленні, виготовленні дослідних зразків ремонтних систем, розробленні та монтажі експериментальних установок для перевірки працездатності розробленої технології та виконанні експериментальної апробації розробленої технології.

6. Дорошенко Я. В., Стецюк С. М., **Бондаренко Р. В.**, Данів З. В. Технології безтраншейної реновації трубопроводних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 2(87). С. 17-32. DOI: 10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32. **Наукове фахове видання України**. Особистий внесок – описав технології виконання робіт з безтраншейної реновації трубопроводів методами SAPL та CIPP. Висвітлив принцип роботи спеціального обладнання, яке для цього використовується. Здійснив огляд матеріалів, які застосовуються у разі виконання робіт такими методами, вказав позитивні і негативні властивості кожного з них, сферу застосування. Брав участь у підготовці статті до публікації.

7. Стецюк С. М., Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Філіпчук О. О., Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу геометричної форми та матеріалу поршнів на ефективність очищення трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 4(89). С. 26-43. DOI: 10.69628/pdogf/4.2023.26. **Наукове фахове видання України**. Особистий внесок – брав участь у розробленні технології виготовлення дослідних зразків очисних поршнів, дослідженні прохідної здатності кожного зразка та підготовці статті до публікації.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Дорошенко Я., **Бондаренко Р.** Експериментальні дослідження динаміки протягування байпасним поршем ремонтних систем у важкодоступні дефектні місця трубопроводів. *Проблеми та перспективи транспортування та зберігання енергоносіїв*. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ – Яремче, 3-4 липня 2025 р.). Івано-Франківськ, 2025. С. 112-113. DOI: <https://doi.org/10.31471/pptzen2025>.

9. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Григорський С. Я., Маркевич М. В. Експериментальні дослідження динаміки протягування ремонтної системи байпасним поршем для виконання внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводних мереж. *Освіта і наука в Україні в період глобальних викликів сьогодення*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 28 листопада 2024 р.). Київ, 2024. С. 149-152. DOI:10.51587/9786-1773-89322-2024-16.

10. Дорошенко Я. В., **Бондаренко Р. В.**, Іванов О. В., Маркевич М. В. Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту трубопровідних мереж для запобігання втрат енергоносіїв. *Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. Матеріали VIII Міжнародного конгресу (Львів, 16-18 жовтня 2024 р.). Львів, 2024. С. 165.

11. **Бондаренко Р. В.**, Данів З. В. Технології внутрішньотрубного відновлення трубопроводів. *Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених (Чернігів, 21 квітня 2023 р.). Чернігів, 2023. С.14-15.

12. Shatskyi, M. Makoviicuk, **R. Bondarenko**, Y. Doroshenko On the estimates of the strength of a damaged pipeline restored by patching [VIII International conference. “In-service damage of materials, its diagnostics and prediction” "DMDP"], (Ternopil, 15-17 october 2025 y.). – Ternopil, 2025 – P. 1-4.

ДОДАТОК Б

ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ З ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДЕФЕКТНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ

Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ПОГОДЖЕНО

Директор Українського науково-дослідного інституту природних газів філії АТ "УкрГазвидобування"



Михайло БРАТАХ

м.п. (підпис)
2024.11.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу



Ігор ЧУДИК

м.п. (підпис)

« 18 » 11 2024 р.

Головний інженер
Району теплових мереж "Печерськ"
СП "Київські теплові мережі"



Костянтин СВИТЕЛЬСЬКИЙ

м.п. (підпис)
2024.11.

Головний інженер
Тисменицького управління
експлуатації газового господарства



Добомир ПЕТРАНИЮК

м.п. (підпис)
2024.11.

ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ З ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДЕФЕКТНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник НТР,
головний науковий співробітник
ІФНТУНГ
докт. техн. наук, професор



Ярослав ДОРОШЕНКО
(загальне керівництво,
розділ 1, 3, 5, 7-9)

Відповідальний виконавець НТР,
головний науковий співробітник
ІФНТУНГ
докт. техн. наук, професор



Василь ЗАПУХЛЯК
(розділ 6, 11-13)

Головний науковий співробітник
ІФНТУНГ
докт. техн. наук, професор



Володимир ГРУДЗ
(розділ 3, 7, 9, 10, 12)

Старший науковий співробітник
ІФНТУНГ
канд. техн. наук, доцент



Станіслав ГРИГОРСЬКИЙ
(розділ 10-12)

Старший науковий співробітник
ІФНТУНГ
канд. техн. наук, доцент



Юлія ДОРОШЕНКО
(розділ 1, 2, 4, додаток А)

Старший науковий співробітник
ІФНТУНГ
канд. техн. наук, доцент



Олександр ІВАНОВ
(розділ 5, 6, 8, 13)

Аспірант
ІФНТУНГ



Роберт БОНДАРЕНКО
(розділ 7-9)

ЗМІСТ

1 Сфера застосування.....	3
2 Нормативні посилання.....	3
3 Терміни та визначення понять.....	5
4 Позначення і скорочення.....	6
5 Загальні положення.....	6
6 Організаційно-підготовчі роботи.....	7
7 Вимоги до технології внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби важкодоступних ділянок трубопроводів установленням бандажа.....	9
8 Технологія виготовлення байпасного поршня.....	11
9 Технологічна послідовність виконання робіт із внутрішньотрубного ремонту локального дефекту стінки важкодоступної ділянки трубопроводу.....	14
10 План дій у разі застрягання байпасного поршня.....	18
11 Заключні роботи.....	19
12 Контроль якості виконання робіт.....	20
13 Заходи безпеки.....	21
Додаток А (довідковий). Бібліографія.....	24

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Дія цієї технологічної інструкції поширюється на роботи з внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби важкодоступних ділянок лінійної частини трубопроводів діаметром до 219 мм включно, розміщених за їх фасонними елементами (крутовигнутими відводами, трійниками), у місцях підводних переходів та переходів через інші перешкоди чи інфраструктурні об'єкти тощо.

1.2 Технологічна інструкція визначає порядок, правила та послідовність виконання робіт із доставки ремонтної системи байпасним поршнем у важкодоступне місце трубопроводу і внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажа в місці локального дефекту стінки труби.

1.3 Технологічна інструкція рекомендована для посадових осіб та працівників організацій, діяльність яких пов'язана з технічним обслуговуванням та ремонтом мереж газопостачання і теплопостачання, систем збору та транспортування газу газових родовищ.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цій технологічній інструкції є посилання на такі нормативні документи:

БН В.2.3-00018201.01.01.01-96 Система антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Основні положення. Загальні вимоги

БН В.2.3-00013741-06:2007 Магістральні трубопроводи. Будівництво. Роботи підготовчого періоду

БН В.2.3-00013741-07:2007 Магістральні трубопроводи. Будівництво. Земляні роботи та рекультивація

БН В.2.3-00013741-09:2009 Магістральні трубопроводи. Будівництво. Лінійна частина. Очищення порожнини та випробування

БН В.2.3-00018201.01.01.01-96 Система антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Основні положення. Загальні вимоги

ВСН 005-88 Будівництво промислових сталевих трубопроводів. Технологія і організація

ВСН 006-89 Будівництво магістральних і промислових трубопроводів. Зварювання

ВСН 008-88 Будівництво магістральних і промислових трубопроводів. Протикорозійна і теплова ізоляція

ВСН 011-88 Будівництво магістральних і промислових трубопроводів. Очищення порожнини і випробування

ВСН 012-88 Будівництво магістральних і промислових трубопроводів. Контроль якості і приймання робіт

ДБН А.3.1-5:2016 Організація будівельного виробництва

ДСТУ 7239-2011 ССБТ Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація

ДСТУ Б В.2.5-29:2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Система газопостачання. Газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії

ДСТУ EN 12732:2022 Газова інфраструктура. Зварювання сталевих

трубопроводів. Функційні вимоги

ДСТУ EN 15632-1:2021 Розподільчі мережі тепlopостачання. Попередньо ізольовані гнучкі системи трубопроводів. Частина 1. Класифікація, загальні вимоги та методи випробувань

ДСТУ EN 15632-2:2021 Розподільчі мережі тепlopостачання. Попередньо ізольовані гнучкі системи трубопроводів. Частина 2. Зв'язана система з пластиковими напірними трубами. Вимоги та методи випробувань

ДСТУ-Н Б А.3.1-18:2013 Настанова щодо зварювання конструкцій газопроводів зі сталевих труб

ДСТУ-Н Б А.3.1-26:2014 Настанова з технології зварювання і контролю якості зварних з'єднань при будівництві промислових трубопроводів

ДСТУ-Н Б А.3.1-30:2015 Настанова щодо зварювання трубопроводів пари та гарячої води

ДСТУ-Н Б В.2.1-28:2013 Настанова щодо проведення земляних робіт, улаштування основ та спорудження фундаментів

ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008 Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами

ДСТУ-Н Б В.2.5-66:2012 Настанова з будівництва, монтажу та контролю якості теплових мереж

НАПБ А.01.001-2014 Правила пожежної безпеки в Україні

НПАОП 0.00-1.71-13 Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями

НПАОП 0.00-1.73-14 Правила охорони праці та безпечної експлуатації технологічних трубопроводів

НПАОП 0.00-1.80-18 Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання

НПАОП 0.00-1.81-18 Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском

НПАОП 0.00-4.12 Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці

НПАОП 0.00-5.11-85 Типова інструкція з організації безпечного проведення газонебезпечних робіт

НПАОП 0.00-7.17-18 Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці

НПАОП 11.1-1.01 Правила безпеки у нафтогазовидобувній промисловості України

НПАОП 11.1-1.01-08 Правила безпеки у нафтогазовидобувній промисловості України

НПАОП 28.52-1.31-13 Правила охорони праці під час зварювання металів

НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів

СОУ 11.2-30019775-114:2007 Промислові трубопроводи. Технічне діагностування. Метод

СОУ 11.2-30019775-178:2010 Трубопроводи сталеві промислові. Визначення технічного стану трубопроводів з дефектами зварювання та корозії

СОУ 09.1-30019775-322:2020 Трубопроводи сталеві промислові. Експертне обстеження лінійної частини. Технічні вимоги

СОУ-Н ЕЕ 20.131:2007 Захист теплових мереж від зовнішньої корозії. Типова інструкція

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

Нижче подано терміни, вжиті в цій технологічній інструкції, та визначення позначених ними понять.

3.1 Байпасний поршень – поршень із наскрізним отвором вздовж його повздовжньої осі, через який частина потоку перетікає крізь нього під час руху трубопроводом.

3.2 Барабан – пристрій призначений для обертання і розмотування намотаної на нього гнучкої трубки.

3.3 Відвід (коліно) – фасонний елемент трубопроводної системи призначений для зміни напрямку потоку газу або робочої рідини в трубопроводі (мають різні кути та радіуси вигину).

3.4 Герметична камера – щільно закрита глухим фланцем або кришкою з одного боку і приварним сталевим кругом з іншого кінця труби призначена для поміщення на осі у її внутрішню порожнину барабана з намотаною гнучкою трубкою.

3.5 Гнучка трубка – пластикова трубка малого діаметра (6-10 мм) виготовлена з гнучкого матеріалу на основі ПВХ, який має високу еластичність, зносостійкість та механічну міцність.

3.6 Еластична оболонка – гумова герметична циліндрична камера, яка надувається і створює необхідний тиск для притискання ремонтного бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу. Здатна повертатися до початкового положення після випускання з неї повітря.

3.7 Крутовигнутий відвід – відвід кутом вигину 90° і радіусом вигину не більше $1,5 \cdot DN$.

3.8 Локальний дефект стінки труби – обмежене ненаскрізне пошкодження на внутрішній або зовнішній поверхні трубопроводу, яке може проявлятися у вигляді корозійних виразок або плям, які впливають на його напружено-деформований стан та безпеку.

3.9 Мережі газопостачання – системи трубопроводів і відводів від них призначені для транспортування і розподілу газу між споживачами на побутові, комунально-побутові й технологічні потреби.

3.10 Мережі теплопостачання – системи трубопроводів і відводів від них призначені для транспортування і постачання теплової енергії споживачам.

3.11 Ремонтна система – закріплена до перфорованого кінця гнучкої трубки обгорнута поліетиленовою плівкою еластична оболонка на яку насунуто ремонтний бандаж.

3.12 Ремонтний бандаж – просякнутий спеціальною термореактивною смолою рукав, який після встановлення у місці дефекту стінки труби формує нову міцну структуру.

3.13 Рукав – безшовний циліндричний гнучкий матеріал із круглого тканого текстилю, поліестеру, поліуретану, поліефіру або композиції різних матеріалів, який є основою для створення міцного герметичного шару в середині труби.

3.14 Силіконовий компаунд – високомолекулярна рідка двокомпонентна система, яка при з'єднанні компонентів (основи і каталізатора) утворює пружний,

еластичний, зносостійкий та стійкий до агресивних середовищ синтетичний кремнійорганічний полімер.

3.15 Системи збору та транспортування газу газових родовищ – системи трубопроводів і відводів від них в одно- або багатонитковому прокладанні призначені для збору та транспортування вуглеводневих газів із районів їх видобування до місць споживання або передачі продукту газотранспортному підприємству.

3.16 Тестове протягування байпасним поршнем ремонтної системи – етап підготовки до виконання ремонтних робіт, який полягає в перевірці здатності байпасним поршнем безперешкодно протягнути ремонтну систему трубопроводом. Цей тест дозволяє виявити проблемні місця трубопроводу, зокрема коліна, трійники тощо, які ускладнюють або унеможливають рух байпасного поршня, доставку до місця виконання робіт ремонтного бандажу і на основі одержаних результатів прийняти рішення щодо подальшої можливості виконання ремонтних робіт або усунення ускладнень.

3.17 Трійник – фасонний елемент трубопровідної системи призначений для розділення або об'єднання потоків газу або робочої рідини в трубопроводі. Трійники мають форму "Т" і дають змогу створити відгалуження або розгалуження в системі трубопроводу.

3.18 Фасонний елемент – спеціальний елемент трубопровідної системи (коліно, трійник, редукція (перехідник)), призначений для з'єднання труб в місцях поворотів, розгалужень трубопроводу або його переходу з одного діаметра труб на інший.

4 ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

DN	умовний діаметр трубопроводу
НДР	науково-дослідна робота

5 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

5.1 Трубопроводи мереж газопостачання та теплопостачання, систем збору та транспортування газу газових родовищ із метою оцінки її поточного технічного стану та визначення обсягу і термінів виконання ремонтних робіт мають підлягати обстеженню із своєчасним виявленням та фіксуванням дефектів стінки труби різноманітними методами з урахуванням вимог СОУ 09.1–30019775–322, СОУ 11.2–30019775–178.

5.2 У важкодоступних місцях обстеження та ремонт трубопроводів мереж газопостачання та теплопостачання, систем збору та транспортування газу газових родовищ рекомендовано виконувати безтраншейними технологіями.

5.3 За результатами обстеження трубопроводу комісія має скласти акт і схему трубопроводу з нанесенням на неї усіх виявлених дефектів із прив'язками і нумерацією пошкоджень.

5.4 На основі даних про фактичний технічний стан трубопроводу оцінюють ступінь небезпеки виявлених дефектів, міцність, працездатність трубопроводу з урахуванням вимог ДСТУ-Н Б В.2.3-21, СОУ 11.2-30019775-114 та приймають рішення про вживання заходів щодо виконання ремонтних робіт.

5.5 Для обстеження виявлених дефектів трубопроводів у важкодоступних місцях, яке виконується з метою уточнення необхідності виконання ремонту, визначення методів ремонту, повинна призначатись комісія з найкваліфікованіших спеціалістів у складі не менше трьох працівників, яку має очолювати головний інженер.

5.6 Для підсилення стінки труби і мінімізації напружень, запобігання витокам, розривам тощо в місцях важкодоступних локальних дефектів трубопроводів рекомендовано виконувати внутрішньотрубне встановлення ремонтних бандажів.

5.7 Щоб виконати внутрішньотрубний ремонт трубопроводу встановленням ремонтного бандажа треба припиняти експлуатацію трубопроводу та його спорожнити.

5.8 Перед початком виконання ремонту на весь комплекс робіт треба оформити такі документи:

- наказ;
- план організації робіт.

5.9 Організацію, підготовчі і заключні роботи та контроль за виконанням ремонтних робіт має здійснювати організація замовник.

5.10 Якщо під час виконання ремонтних робіт з'ясувалась неможливість їх подальшого виконання на даній ділянці трубопроводу, обумовлена її технічним станом, організація замовник розробляє детальний план організаційно-технічних заходів із усунення виявлених недоліків та підготовки ділянки трубопроводу до продовження виконання ремонтних робіт.

5.11 Під час виконання ремонтних робіт заборонено:

- змінювати режими роботи трубопроводу, маніпулювати перекривною арматурою трубопроводу;
- виконувати на ремонтованій ділянці трубопроводу роботи, не пов'язаних із ремонтом.

5.12 Ця технологічна інструкція базується на результатах виконання НДР, результатах експериментальних досліджень динаміки процесу протягування поршнем ремонтної системи трубопроводом. У міру удосконалення технології доставки ремонтної системи до місця виконання ремонтних робіт, внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажа ця технологічна інструкція може корегуватися.

6 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ПІДГОТОВЧІ РОБОТИ

6.1 Комплекс робіт щодо внутрішньотрубного ремонту трубопроводів у важкодоступних місцях має виконувати спеціалізована бригада, персонал якої має мати:

- ліцензію на виконання ремонтних робіт;
- допуск (дозвіл) на виконання робіт;
- протоколи перевірки знань (або посвідчення);
- сертифікати якості використовуваних матеріалів.

6.2 Підготовку до виконання ремонту має виконувати організація, яка експлуатує трубопровід (організація замовник).

6.3 До початку виконання ремонтних робіт наказом треба призначити керівника робіт, який відповідає за організацію ремонту, якість виконання робіт, дотримання технологічного процесу та вимог охорони праці.

6.4 Виробничий відділ або служба організації (підрозділу), на об'єкті або в межах роботи якої виконуються роботи має оформити план організації робіт та визначити організаційно-технологічну послідовність їх виконання.

6.5 План організації робіт має містити:

- назву організації замовника;
- назву організації виконавця;
- назву трубопроводу;
- назву ремонтної ділянки;
- місце виконання робіт;
- дату і час початку та закінчення робіт;
- діаметр, номінальну товщину стінки та марку сталі трубопроводу;
- пікетну відмітку місця під'єднання до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту;
- пікетну відмітку місця ремонтного дефекту;
- технічні та конструктивні вимоги до ремонтного трубопроводу;
- детальну схему ремонтної ділянки трубопроводу;
- характеристику важкодоступної ділянки трубопроводу;
- конструктивні параметри відводів, трійників ремонтного трубопроводу;
- вид та розміри дефекту;
- вимоги до виконання усіх видів робіт;
- вимоги до матеріалів;
- схему розстановки обладнання, механізмів;
- час витримування притиснутого ремонтного бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу;
- список персоналу, який приймає участь у роботі, із зазначенням прізвищ та посад керівників робіт;
- поопераційний розпис ремонтних робіт;
- поопераційний розпис робіт із випробувань відремонтованої ділянки трубопроводу.

6.6 План організації робіт має бути погоджений із керівниками організацій (підрозділів), службами, які беруть участь у виконанні робіт, пожежною охороною організації та затверджений керівником, який підписав наказ про виконання робіт.

6.7 У місці, де планується під'єднати до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту організація, яка експлуатує трубопровід, має виконати наступні підготовчі роботи:

- оглянути ділянку трубопроводу;
- визначити розміщення поздовжньої осі та глибину закладання ремонтного трубопроводу і інших близько розміщених трубопроводів;
- позначити трубопровід кілками з зазначенням фактичної глибини його закладання (осі інших комунікацій також позначити кілками);
- оконтурити межі ремонтних робіт, закріпити на місцевості попереджувальні знаки;
- розробити котлован;
- перекрити та спорозжити ремонтну ділянку трубопроводу;
- зняти ізоляційне покриття;
- вирізати котушку труби;
- нарізати різь або приварити фланець до ремонтної ділянки трубопроводу.

6.8 Перекривна арматура на оглянутій ділянці трубопроводу має бути справна і надійно тримати тиск. Перед виконанням ремонту організація замовник має виконати ревізію перекривної арматури і усунути усі дефекти.

6.9 Після одержання плану організації робіт спеціалізована бригада має підготувати комплект устаткування, інвентар, матеріали для виконання ремонтних робіт.

6.10 У разі підземного прокладання трубопроводу в місці, де планується під'єднати до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту проєктувати та виконувати підготовчі роботи і розробляти котлован треба відповідно до проєкту та вимог ВБН В.2.3-00013741-06, ВБН В.2.3-00013741-07, ВСН 005-88, ДСТУ-Н Б В.2.1-28, [1].

6.11 Розміри котловану повинні бути такі, щоб була забезпечена зручність виконання усіх робіт (газоелектрозварювальних, ізолювальних, тощо). Із котловану повинно бути не менше двох виходів у протилежні напрями.

6.12 Розкопування котловану одноковшовим екскаватором на газопроводі, який знаходиться під тиском, треба виконувати з наближенням ріжучих кромek зубів ковша на віддаль не ближче ніж 0,5 м до труби, при цьому ходова частина і опорні елементи екскаватора не мають переміщуватись безпосередньо над трубопроводом. Розроблення ґрунту безпосередньо біля труби та підкопування під нею треба виконати вручну.

6.13 На теплопроводах та спорожнених від газу газопроводах розкопування котловану дозволено виконувати одноковшовим екскаватором на повну глибину з дотриманням заходів безпеки, які унеможливають пошкодження трубопроводу.

6.14 Якщо в котлован надходять ґрунтові води, то дно котловану роблять з нахилом в один бік і влаштовують приямок для води, звідки її треба відкачувати.

6.15 У разі потреби стінки котловану укріплюють від обвалювання або влаштовують відкоси відповідно до вимог ДСТУ-Н Б В.2.1-28, ВБН В.2.3-00013741-07.

6.16 Довжина котушки труби, яку треба вирізати, повинна бути такою, щоб була забезпечена можливість монтажу циліндричної герметичної камери.

6.17 Розрізання трубопроводу рекомендовано виконувати з виконанням скосу кромek для отримання фаски на кінці залишкової труби.

7 ВИМОГИ ДО ТЕХНОЛОГІЇ ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ЛОКАЛЬНИХ ДЕФЕКТІВ СТІНКИ ТРУБИ ВАЖКОДОСТУПНИХ ДІЛЯНОК ТРУБОПРОВОДІВ УСТАНОВЛЕННЯМ БАНДАЖА

7.1 Внутрішньотрубний ремонт установленням бандажа рекомендовано застосовувати для таких дефектів:

- загальна корозія (зовнішня та внутрішня);
- піттингова корозія;
- корозійні плями;
- корозійні виразки.

7.2 Не підлягають внутрішньотрубному ремонту установленням бандажа такі дефекти:

- тріщини;
- наскрізні дефекти;
- стрес-корозійні дефекти;

- гофри;
- вм'ятини.

7.3 Визначення можливості виконання внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби з доставкою ремонтної системи до місця важкодоступного дефекту трубопроводу байпасним поршнем і установленням ремонтного бандажу треба здійснювати на основі аналізу технологічної схеми трубопроводу, стану внутрішньої поверхні стінки труби. Особливу увагу треба звертати на зміну діаметра труб, схеми руху потоків трійниками, наявність напливів у місці зварних швів, нерівнопрохідної арматури, забруднень у трубопроводі, накипу, можливостей з приєднання герметичної камери до трубопроводу та видалення байпасного поршня з нього після виконання ремонтних робіт тощо.

7.4 Не рекомендовано застосовувати технологію якщо конструктивна схема трубопроводу передбачає протягування байпасним поршнем ремонтної системи із магістралі у відгалуження трійника.

7.5 Якщо протягування байпасним поршнем ремонтної системи треба виконати із відгалуження у магістраль трійника, то протилежна до ремонтваної ділянка трубопроводу (відносно відгалуження трійника) повинна бути перекрита. Рекомендовано з неї здійснювати подавання повітря.

7.6 Для виявлення різноманітних перешкод руху байпасного поршня трубопроводом, уточнення місцезнаходження і характеристик локального дефекту стінки труби, визначення віддалі від початку трубопроводу до локального дефекту стінки труби рекомендовано застосовувати технології внутрішньотрубного відеоогляду, інспектування трубопроводів, зокрема ендоскопічні або роботизовані системи. Для інспектування трубопроводів рекомендовано застосувати лазерне сканування та ультразвукове діагностування.

7.7 Для внутрішньотрубного відеоогляду рекомендовано застосовувати цифрові відеокамери. За цифровим відеозображенням та результати лазерного сканування рекомендовано створювати 3D графічне зображення внутрішньої поверхні трубопроводу.

7.8 У разі застосовування роботизованих систем рекомендовано роботи з гусеничним рушієм, які мають підвищену прохідність і можуть проходити різні перешкоди у внутрішній порожнині трубопроводів, зокрема крутовигнуті відводи та трійники.

7.9 У разі виявлення дефектів стінки труби треба визначити їх місце розташування, виміряти довжину, ширину та глибину, радіус кривизни дна дефекту та кут орієнтації великої осі відносно осі трубопроводу.

7.10 Для визначення місця розташування дефектів стінки труби треба розробити схему реперних точок (як маркери треба використовувати перекривну арматуру, відводи, трійники, вузли врізок тощо).

7.11 Якщо у внутрішній порожнині трубопроводу наявні забруднення то до виконання ремонтних робіт треба його очистити. Для цього рекомендовано застосовувати очисні поршні, які необхідно виготовляти та використовувати з урахуванням вимог [2, 3].

7.12 Байпасний поршень треба виготовити із силіконового компаунда.

7.13 Еластична оболонка ремонтної системи має бути обгорнута поліетиленовою плівкою.

7.14 Як ремонтний бандаж рекомендовано застосовувати безшовний рукав виготовлений із круглого тканого текстилю, поліестеру, поліуретану або полієфіру.

7.15 Якщо ремонтний бандаж має мати велику питому жорсткість і міцність рекомендовано використовувати композитні рукави (звичайні рукави армовані шарами вуглецевого волокна та/або скловолокна, термопластичних поліефірних, поліпропіленових волокон, закріплених у щільну повсть). Вуглецеве волокно рекомендовано якщо треба забезпечити більшу жорсткість рукава, а скловолокно – кращий захист від корозії.

7.16 Зовнішній шар рукава має мати напівпористу структуру.

7.17 Для просочування рукава рекомендовано застосовувати термореактивні смоли – вінілові ефіри і епоксидні.

7.18 Щоб підвищити надійності доставки і встановлення ремонтний бандаж доцільно охолодити.

7.19 Довжина ремонтного бандажа повинна бути такою, щоб після встановлення він перекривав увесь локальний дефект і прилеглі до нього ділянки труби на довжину не менше ніж 30 мм у обидві сторони від дефекту.

7.20 Максимальна довжина бандажа не повинна перевищувати діаметр трубопроводу більше ніж у 3 рази.

7.21 Для пришвидшення процесу твердіння термореактивної смоли рекомендовано забезпечити циркуляція теплого повітря після притискання ремонтного бандажа до внутрішньої стінки трубопроводу в місці локального дефекту. Для цього під час виготовлення ремонтної системи у еластичній оболонці та поліетиленовій плівці треба виконати невеликі отвори та застосовувати повітряний нагнітач із нагрівачем.

7.22 Після твердіння термореактивної смоли поліетиленова плівка, якою обгорнута еластична оболонка, не повинна приклеїтись до ремонтного бандажа.

8 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БАЙПАСНОГО ПОРШНЯ

8.1 Байпасний поршень для протягування ремонтної системи трубопроводом, який містить фасонний елемент (коліно, трійник) треба виготовляти із силіконового компаунда на олов'яному каталізаторі (поліконденсаційного).

8.2 Технічна послідовність виконання робіт із виготовлення байпасного поршня із силіконового компаунда:

- побудова 3D моделі байпасного поршня;
- побудова 3D моделі ливарної форми;
- виготовлення ливарної форми;
- поміщення спиць та осердя в ливарну форму;
- приготування суміші силікону (основи) і каталізатора;
- заливання суміші в ливарну форму;
- технічна перерва для твердіння силіконового компаунда;
- вилучення спиць з ливарної форми;
- вилучення байпасного поршня з ливарної форми;
- вилучення осердя з байпасного поршня;
- контроль якості байпасного поршня.

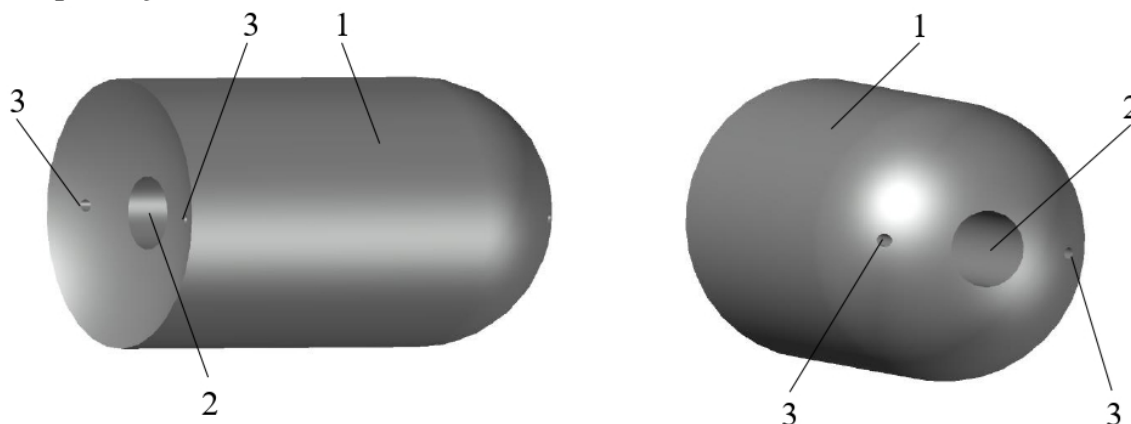
8.3 Послідовність виготовлення 3D моделі байпасного поршня:

- розроблення форми байпасного поршня;
- двовимірне креслення байпасного поршня;
- розрахунок, визначення розмірів байпасного поршня;
- побудова 3D моделі байпасного поршня;

- перевірка 3D моделі та внесення змін і доповнень до проєкту (у разі потреби).

8.4 Для розроблення форми байпасного поршня треба виконати збір і аналіз інформації. За основу рекомендовано приймати креслення, схеми, 3D моделі, фотографії та описи аналогів. Приклад 3D моделі байпасного поршня подано на рисунку 8.1.

8.5 Діаметр байпасного поршня повинен бути рівний внутрішньому діаметру трубопроводу.



1 – байпасний поршень; 2 – наскрізний отвір; 3 – отвори для кріплення сталевим дротом ремонтної системи

Рисунок 8.1 – Приклад 3D моделі байпасного поршня

8.6 Довжина байпасного поршня повинна бути в межах від DN до $1,4 \cdot DN$.

8.7 Діаметр наскрізного отвору 2 (рисунок 8.1) вздовж повздовжньої осі байпасного поршня повинен бути в межах від $0,2 \cdot DN$ до $0,3 \cdot DN$.

8.8 Передній торець байпасного поршня повинен бути опуклим, а задній – вгнутим.

8.9 Байпасний поршень повинен мати наскрізні отвори 3 (рисунок 8.1) для кріплення до нього сталевим дротом ремонтної системи.

8.10 Основою 3D-моделі ливарної форми (рисунок 8.2) є 3D-модель байпасного поршня (рисунок 8.1).

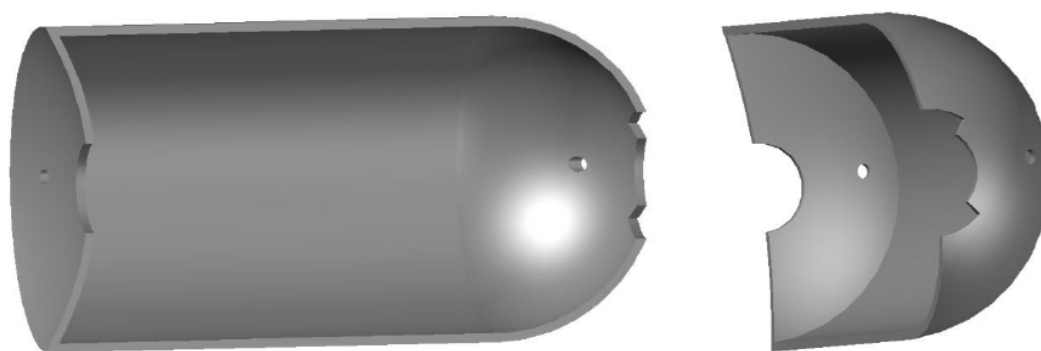


Рисунок 8.2 – Приклад 3D моделі ливарної форми

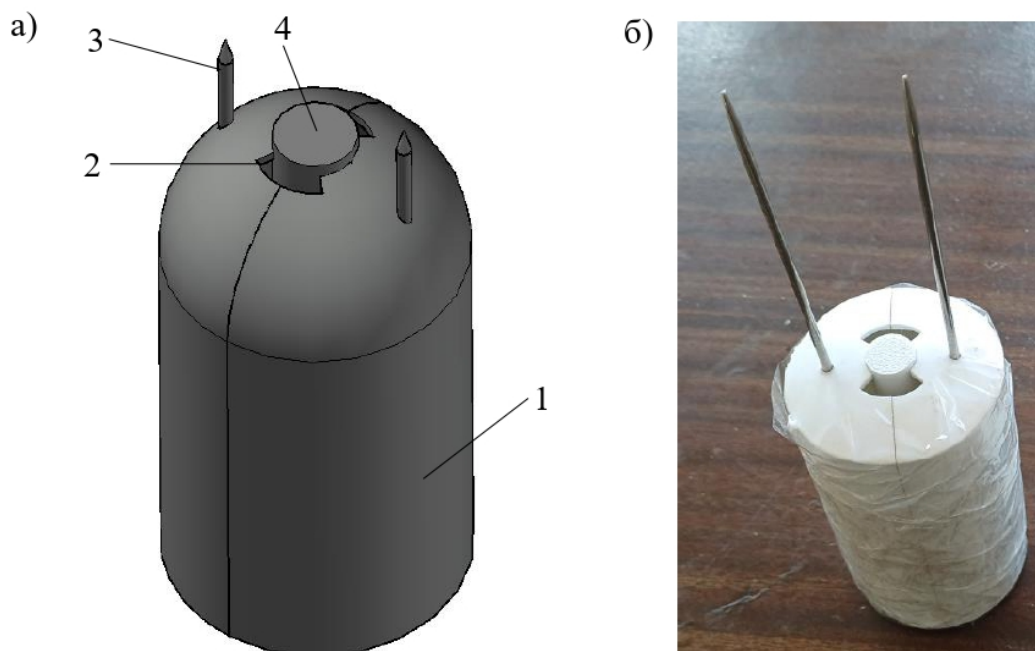
8.11 Товщина стінки ливарної форми виготовленої 3D друком із пластику, яка забезпечує мінімальну її міцність повинна складати 0,8 мм. Для забезпечення довговічності ливарних форм рекомендовано щоб їх товщина стінки була від 1,2 мм до 2 мм.

8.12 Ливарна форма для байпасного поршня повинна складатись з двох половин, які треба з'єднати між собою (рекомендовано застосовувати липку стрічку (скоч), щоб суміш не просочувалась крізь щілини).

8.13 Перед з'єднанням двох половин ливарної форми між собою треба очистити їх від пилу і бруду та помістити в них спиці 3 (рисунок 8.3, а).

8.14 Ливарна форма 1 (рисунок 8.3, а) повинна мати горловину 2 для лиття.

8.15 У ливарну форму 1 (рисунок 8.3, а) треба помістити циліндричне осердя 4.



а) – 3D модель; б) – фото;

1 – ливарна форма; 2 – горловина; 3 – спиця; 4 – циліндричне осердя

Рисунок 8.3 – Підготовлена до лиття ливарна форма

8.16 Приготування суміші силіконової основи і каталізатора виконують в окремій чистій і сухій вимірювальній ємності з лійкою об'єм якої повинен бути не менше ніж на 20 % більший об'єму внутрішньої порожнини ливарної форми.

8.17 Щоб визначити об'єм необхідного силікону (основи) треба розрахувати об'єм внутрішньої порожнини ливарної форми.

8.18 Підготовку суміші основи і каталізатора виконують у такій послідовності:

- доведення компонентів до кімнатної температури;
- струшування основи і каталізатора (під час зберігання може утворюватися осад);
- дозування основи і каталізатора у зазначених виробником компаунда конкретного маркування пропорціях;
- ретельне перемішування основи і каталізатора механічним або ручним способом протягом 3-5 хвилин (до формування однорідної маси). Особливу увагу треба звертати на стінки та дно ємності.

8.19 Під час підготовки суміші конкретного маркування треба дотримуватись пропорцій основи і каталізатора, зазначених виробником компаунда конкретного маркування, і правил роботи з ним (недотримання пропорцій основи і каталізатора порушує перебіг хімічної реакції, що призводить до неповного затвердіння силіконового компаунда і наявності рідких місць).

8.20 Для надавання забарвлення очисному поршню під час перемішування основи і каталізатора треба додавати барвник – флуоресцентні пігменти для забарвлення силікону, масляну фарбу (додавання барвника також дає змогу індикації рівномірного розподілу каталізатора в масі основи).

8.21 Тривале перемішування основи і каталізатора не рекомендовано, оскільки може призвести до утворення великої кількості бульбашок повітря в суміші.

8.22 Суміш після перемішування треба одразу вилити тонким струменем у горловину ливарної форми через лійку вимірювальної ємності таким чином, щоб силікон поступово сам розподілявся в формі. Зволікання, повільне виливання може призвести до суттєвого збільшення в'язкості суміші і ускладненого (неможливого) виливання, залишку суміші в вимірювальній ємності.

8.23 Не рекомендовано використовувати мікрохвильову піч для прискорення реакцій полімеризації силікону.

8.24 Після полімеризації силіконового компаунда треба видалити з'єднувач (липку стрічку), видалити спиці 3 (рисунок 8.3, а) і відокремити дві половини ливарної форми 1 та акуратно виїняти байпасний поршень. Силіконова маса має бути твердою, однорідною і мати гумоподібний вигляд.

8.25 Із байпасного поршня треба видалити циліндричне осердя 4 (рисунок 8.3, а).

8.26 Контроль якості байпасного поршня треба виконати візуально після його вилучення з ливарної форми 1 (рисунок 8.3).

9 ТЕХНОЛОГІЧНА ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБІТ ІЗ ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО РЕМОНТУ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФЕКТУ СТІНКИ ВАЖКОДОСТУПНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ

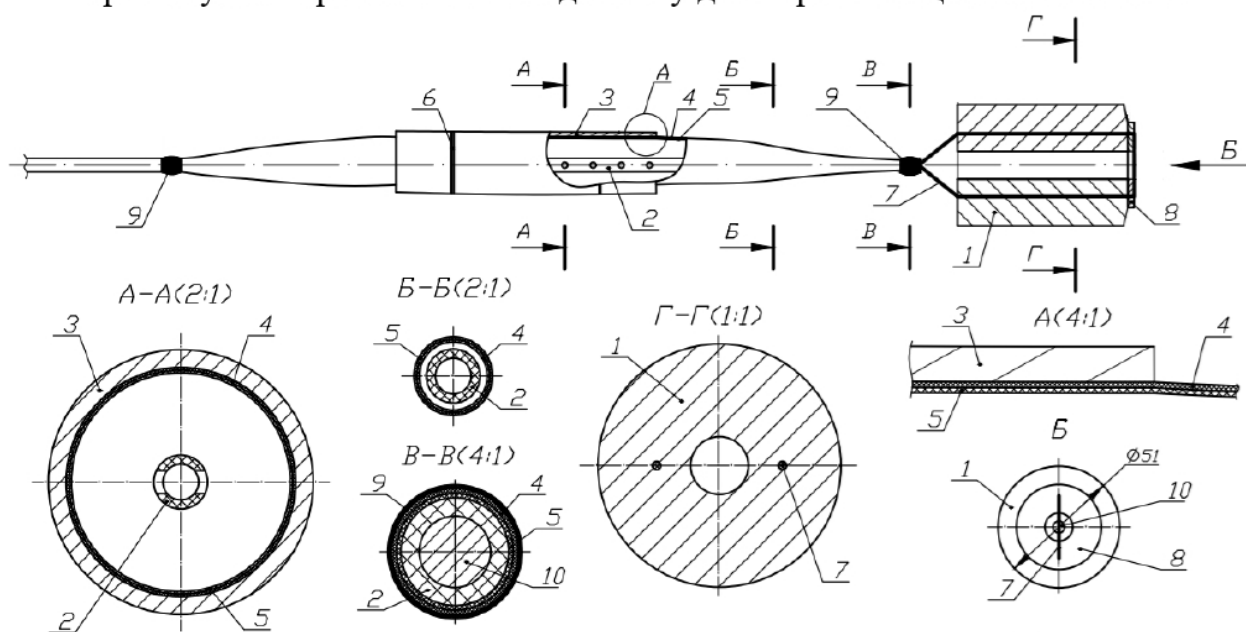
9.1 Технологічна послідовність виконання робіт із внутрішньотрубного ремонту локального дефекту стінки важкодоступної ділянки трубопроводу:

- тестове протягування байпасним поршнем ремонтної системи ремонтною ділянкою трубопроводу;
- визначення віддалі від початку трубопроводу до локального дефекту стінки труби;
- підготовка ремонтної системи до виконання робіт (рисунок 9.1);
- кріплення байпасного поршня 1 до ремонтної системи;
- підготовка циліндричної герметичної камери до протягування байпасним поршнем 1 ремонтної системи;
- протягування байпасним поршнем 1 ремонтної системи до місця локального дефекту трубопроводу;
- внутрішньотрубне встановлення ремонтного бандажа 3 в місці локального дефекту;
- видалення байпасного поршня 1, еластичної оболонки 5 та гнучкої трубки 2 із трубопроводу;
- випробування відремонтованого трубопроводу;
- внутрішньотрубний відеоконтроль якості встановлення ремонтного бандажа 3.

9.2 Під час тестового протягування байпасним поршнем ремонтної системи трубопроводом ремонтний бандаж не має бути просякнутий термореактивною смолою, а кінець гнучкої трубки не повинна бути закріплений до валу барабана.

9.3 Підготовка ремонтної системи (рисунок 9.1) до виконання робіт полягає у наступному:

- визначення необхідної довжини гнучкої трубки 2;
- встановлення заглушки 10 на початку гнучкої трубки 2 (в місці кріплення до неї байпасного поршня 1);
- перфорування стінки гнучкої трубки 2 в місці кріплення до неї еластичної оболонки 5;
- насування еластичної оболонки 5 на початок гнучкої трубки 2;
- обгортання еластичної оболонки 5 поліетиленовою плівкою 4;
- прив'язування у двох місцях зав'язками 9 еластичної оболонки 5 і поліетиленової плівки 4 до гнучкої трубки 2;
- вимірювання і відрізання необхідної довжини рукава;
- нанесення на зовнішню поверхню рукава термореактивної смоли;
- насування на поліетиленову плівку ремонтного бандажа 3;
- прив'язування ремонтного бандажа 3 у двох-трьох місцях зав'язками 6.



- 1 – байпасний поршень; 2 – гнучка трубка; 3 – ремонтний бандаж;
4 – поліетиленова плівка; 5 – еластична оболонка; 6, 9 – зав'язка; 7 – сталевий дріт; 8 – пластмасове кільце; 10 – заглушка

Рисунок 9.1 – Схема ремонтної системи з байпасним поршнем

9.4 Необхідна довжини гнучкої трубки 2 (рисунок 9.1) визначається віддаллю від початку трубопроводу до локального дефекту стінки труби (повинна бути такою, щоб після повного розмотування гнучкої трубки 2 з барабану ремонтна система була в місці локального дефекту стінки труби і відбулось гальмування байпасного поршня 1).

9.5 Стінку гнучкої трубки 2 (рисунок 9.1) треба перфорувати тільки в місці кріплення до неї еластичної оболонки 5 (отвори у гнучкій трубці повинні бути в середині еластичної оболонки).

9.6 Під час нанесення на зовнішню поверхню рукава термореактивної смоли її треба рівномірно розподіляти усією поверхнею. Після нанесення рукав треба витримати для проникнення смоли в пори, волокна та капіляри між волокнами рукава. Час витримування залежить від типу термореактивної смоли, її в'язкості та температури довкілля і може складати від 10 хв до 30 хв.

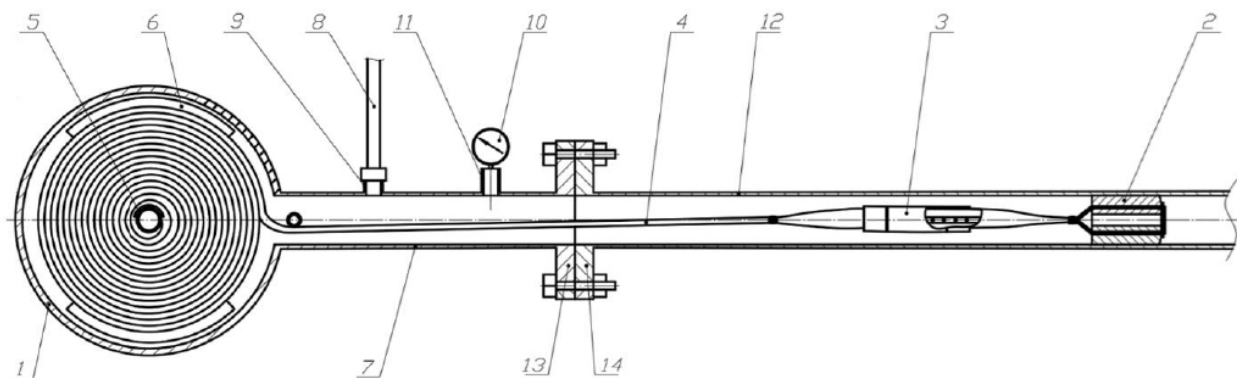
9.7 Прив'язування ремонтного бандажа 3 (рисунок 9.1) до еластичної оболонки 5 рекомендовано виконати у двох-трьох місцях неміцними зав'язками 6 (рекомендовано застосовувати клейку малярну стрічку (від 2 до 3 витки), силіконові або гумові кільця). Кріплення має бути достатньо міцним щоб витримати навантаження при протягуванні байпасним поршнем 1 ремонтної системи.

9.8 Байпасний поршень 1 (рисунок 9.1) до ремонтної системи треба прикріпити міцним сталевим дротом 7. Для цього сталевий дріт 7 (рисунок 9.1) треба просунути через наскрізні отвори 3 (рисунок 8.1) в байпасному поршні 1 та отвори в пластиковому кільці 8 (рисунок 9.1) і прив'язати до початку гнучкої трубки 2 в місці, де вона заглушена заглушкою 10.

9.9 Сталевий дріт 7 (рисунок 9.1) має щільно притискати пластикове кільце 8 до байпасного поршня 1.

9.10 Підготовка циліндричної герметичної камери 1 до протягування байпасним поршнем 2 ремонтної системи 3 (рисунок 9.2) складається з наступних технологічних операцій:

- закріплення кінця гнучкої трубки 4 пластиною 5 до валу барабана 6;
- намотування гнучкої трубки 4 на вал барабана 6;
- поміщення байпасного поршня 2 із прикріпленою до нього ремонтною системою 3 у середину циліндричної герметичної камери 1 і витягування їх з трубної котушки 7 герметичної камери 1;
- поміщення барабана 6 із намотаною гнучкою трубкою 4 у середину циліндричної герметичної камери 1;
- закривання глухим фланцем бічного торця герметичної камери 1;
- приєднання шлангу компресора 8 до штуцера 9 трубної котушки 7 герметичної камери 1;
- приєднання манометра 10 до штуцера 11 трубної котушки 7 герметичної камери 1;
- запасування байпасного поршня 2 у внутрішню порожнину ремонтного трубопроводу 12;
- кріплення герметичної камери 1 фланцем 13 трубної котушки 7 до фланця 14 ремонтного трубопроводу 12.



- 1 – герметична камера; 2 – байпасний поршень; 3 – ремонтна система;
 4 – гнучка трубка; 5 – вигнута пластина; 6 – барабан; 7 – трубна котушка;
 8 – шланг компресора; 9, 11 – штуцер; 10 – манометр; 12 – трубопровід;
 13, 14 – фланець

Рисунок 9.2 – Схема пристрою для внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопроводів протягуванням ремонтної системи поршнем

9.11 Закріплення кінця гнучкої трубки 4 (рисунок 9.2) до валу барабана 6 рекомендовано виконати її затисканням вигнутою металевою пластиною 5 та загвинчуванням болтів.

9.12 Барабан 6 (рисунок 9.2) із намотаною гнучкою трубкою 4 у середину циліндричної герметичної камери 1 треба помістити на осі. Для цього вал барабана 6 треба вставити в приварену до сталевго круга герметичної камери 1 трубу. Тоді в вал барабана 6 помістити приварену до глухого фланця трубу і закрутити болти.

9.13 Щоб забезпечити протягування байпасним поршнем 2 (рисунок 9.2) ремонтної системи 3 трубопроводом 12 треба подати повітря компресором шлангом 8 у запоршневий простір.

9.14 Під час протягування байпасним поршнем 2 (рисунок 9.2) ремонтної системи 3 трубопроводом 12 треба фіксувати покази манометра 10.

9.15 Швидкість протягування байпасним поршнем 2 (рисунок 9.2) ремонтної системи 3 трубопроводом 12 треба регулювати зміною витрати повітря краном на виході компресора.

9.16 Якщо під час протягування байпасним поршнем 2 (рисунок 9.2) ремонтної системи 3 відбулось різке значне збільшення показів манометра 10 і воно триває більше ніж 5 с то подавання повітря компресором у трубопровід треба припинити і відкрити герметичну камеру 1 відкручуванням болтів кріплення глухого фланця.

9.17 Процес протягування байпасним поршнем 2 (рисунок 9.2) ремонтної системи 3 трубопроводом 12 до місця локального дефекту стінки труби завершено, якщо гнучка трубка 4 з барабану 6 розмотана повністю.

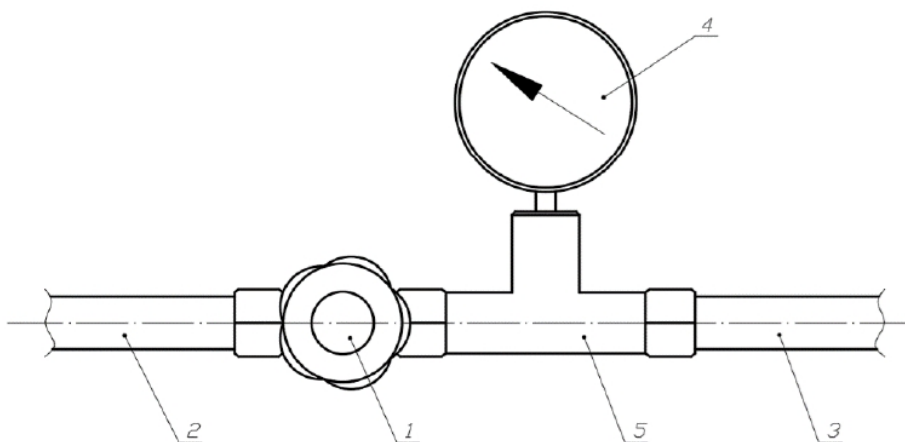
9.18 Якщо гнучка трубка 4 (рисунок 9.2) з барабану 6 розмотана повністю, то рекомендовано виконати контроль місцезнаходження байпасного поршня 2. Для цього з протилежного кінця ремонтного трубопроводу 12 рекомендовано проштовхнути чи запустити в нього пристрій для внутрішньотрубного відеоогляду, зокрема ендоскопічну систему для труб чи роботизовану систему.

9.19 Внутрішньотрубне встановлення ремонтного бандажу в місці локального дефекту трубопроводу 12 (рисунок 9.2) складається з наступних технологічних операцій:

- відкривання герметичної камери 1 (рисунок 9.2) відкручуванням болтів кріплення глухого фланця;
- відкріплення гнучкої трубки 4 (рисунок 9.2) від валу барабана 6;
- від'єднання шлангу 8 (рисунок 9.2) компресора від штуцера 12 трубної котушки 7 герметичної камери 1;
- приєднання до гнучкої трубки 4 (рисунок 9.2) вузла регулювання тиску у еластичній оболонці;
- відкривання вентиля 1 (рисунок 9.3) і компресором шлангом 2 через гнучку трубку 3 нагнітання повітря у еластичну оболонку;
- контроль манометром 4 (рисунок 9.3) тиску у еластичній оболонці.

9.20 Відкріплення гнучкої трубки 4 (рисунок 9.2) від валу барабана 6 треба виконати через проріз у боковому диску барабана 6. Для цього потрібно відкрутити болти і зняти вигнуту металеву пластину 5.

9.21 Вузол регулювання тиску у еластичній оболонці повинен містити вентиль 1 (рисунок 9.3) та манометр 4.



1 – вентиль; 2 – шланг; 3 – гнучка трубка; 4 – манометр; 5 – трійник

Рисунок 9.3 – Схема вузла регулювання тиску у еластичній оболонці

9.22 Нагнітання повітря у еластичну оболонку призводить до збільшення в ній тиску, її роздування і розривання неміцних зав'язок та щільного притискування ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу в місці локального дефекту.

9.23 Тиск у еластичній оболонці під час витримування притиснутим нею ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу повинен бути в межах від 0,09 МПа до 0,1 МПа.

9.24 Регулювання тиску в еластичній оболонці здійснюють вентилем 1 (рисунок 9.3), а його контроль манометром 4.

9.25 Час витримування притиснутого ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу залежить від часу затвердіння термореактивної смоли, який може складати від 30 хв до декількох годин залежно від типу смоли, температури довкілля, товщини нанесеного шару.

9.26 Для пришвидшення процесу твердіння термореактивної смоли замість компресора рекомендоване застосування повітряного нагнітача із нагрівачем. У такому разі час затвердіння термореактивної смоли може складати від 10 хв до 30 хв.

9.27 Видалення байпасного поршня 2 (рисунок 9.2), еластичної оболонки та гнучкої трубки 4 із трубопроводу 12 здійснюється наступним чином:

- від'єднання гнучкої трубки 3 (рисунок 9.3) від вузла регулювання тиску у еластичній оболонці і її поміщення у герметичну камеру 1 (рисунок 9.2);
- закривання глухим фланцем бічного торця герметичної камери 1 (рисунок 8.2) закручуванням болтів;
- приєднання шлангу 8 (рисунок 9.2) компресора до штуцера 12 трубної котушки 7 герметичної камери 1;
- влаштування вузла приймання байпасного поршня або можливості вільного його виходу з ремонтного трубопроводу в довкілля;
- нагнітання компресором повітря у трубопровід 12.

9.28 У результаті від'єднання гнучкої трубки 3 (рисунок 9.3) від трійника 5 тиск у ній і еластичній оболонці повинен зменшитись до атмосферного.

9.29 У результаті нагнітання компресором повітря у трубопровід 12 (рисунок 9.2) тиск у запоршневому просторі зростає і байпасний поршень повинен почати рухатись трубопроводом 12 і вийти з нього витягнувши за собою еластичну оболонку і гнучку трубку 4.

9.30 Після видалення з трубопроводу 12 (рисунок 9.2) байпасного поршня 2, еластичної оболонки та гнучкої трубки 4 треба демонтувати герметичну камеру 1.

9.31 Внутрішньотрубний відеоконтроль якості встановлення ремонтного бандажа рекомендовано здійснювати ендоскопічними системами для труб або роботизованими системами.

10 ПЛАН ДІЙ У РАЗІ ЗАСТРЯГАННЯ БАЙПАСНОГО ПОРШНЯ

10.1 У разі застрягання байпасного поршня у внутрішній порожнині трубопроводу треба визначити місце та причини його застрягання.

10.2 Місце застрягання байпасного поршня у внутрішній порожнині трубопроводу рекомендовано визначати за довжиною гнучкої трубки, яку байпасний поршень затягнув за собою у ремонтований трубопровід.

10.3 Причиною застрягання байпасного поршня може бути:

- значне зміщення кромок, напливи металу у внутрішню порожнину трубопроводу в місці зварних швів, інші непередбачувані механічні перешкоди зумовлені недотриманням норм і правил під час будівництва, реконструкції та ремонту трубопроводу тощо;

- фасонні елементи трубопроводів (крутовигнуті відводи, трійники);
- недостатній запоршневий тиск;
- значне накопичення забруднень перед поршнем;
- значне зношення поршня;
- розривання елементів поршня;
- надмірна жорсткість, довжина поршня;
- занадто великий діаметр наскрізного отвору в поршні;
- інші непередбачувані причини.

10.4 Причинами значного зношення байпасного поршня можуть бути:

- занадто велика довжина трубопроводу;
- наявність великої кількості абразивних частинок у трубопроводі;
- наявність гострих напливів в місці зварних швів.

10.5 Рекомендований план дій у разі застрягання очисного поршня:

- збільшення витрати, тиску на вході трубопроводу;
- короткочасне подавання потоку в реверсному напрямку для видалення поршня з місця застрягання і тоді повернення до аверсного напрямку потоку;
- перекидання подавання компресором повітря в трубопровід (у результаті часткового стискання поршня в трубопроводі може відбутись сильне деформування поршня, що призводить до виникнення значного перетікання через нього. Зменшення тиску може призвести до відновлення його геометричної форми);
- закачування невеликого обсягу рідини в газопровід і подавання швидкісного газового потоку та створення гідроудару на поршні;
- закачування під тиском рідини в газопровід.

11 ЗАКЛЮЧНІ РОБОТИ

11.1 У місці, де здійснювалось під'єднання до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту організація, яка експлуатує трубопровід, має виконати такі заключні роботи:

- монтаж котушки труби;

- остаточне очищення металу труби та зварних швів металевими щітками або електро-, пневмоінструментом з щітками. Очищена поверхня повинна бути сірого кольору з характерним металевим блиском;

- ізолювання змонтованої котушки труби та прилеглих до неї ділянок трубопроводу;

- контроль якості ізоляційного покриття;

- засипання котловану;

- випробування відремонтованої ділянки трубопроводу;

- включення до роботи відремонтованої ділянки трубопроводу.

11.2 Механічні властивості, хімічний склад сталі і товщина стінки монтрованої котушки труби повинні бути аналогічні демонтованій. Рекомендовано щоб вони були з однієї і тієї ж марки сталі.

11.3 Перед монтажем котушку труби треба оглянути і переконатись у відсутності тріщин, вм'ятин, подряпин тощо.

11.4 Монтаж котушки труби треба виконувати з врахуванням вимог ДСТУ EN 12732, ДСТУ-Н Б А.3.1-18, ДСТУ-Н Б А.3.1-30, ДСТУ-Н Б В.2.5-66, ВСН 006.

11.5 Ізолювати трубопровід треба таким ж покриттям, яким він ізолюваний з урахуванням вимог ВБН В.2.3-00018201.01.01.01, ВСН 008, ДСТУ Б В.2.5-29, СОУ-Н ЕЕ 20.131.

11.6 Під час засипання трубопроводу треба вручну насипати м'який ґрунт навколо труби, заповнювати пазухи та ущільнювати ґрунт.

11.7 Після засипання трубопроводу треба спланувати територію.

11.8 Випробування відремонтованої ділянки трубопроводу здійснюється внутрішнім тиском за стандартними методиками з урахуванням вимог ВБН В.2.3-00013741-09, ВСН 011, ДСТУ EN 15632-1, ДСТУ EN 15632-2, ДСТУ-Н Б А.3.1-26.

11.9 Якщо під час збільшення тиску в процесі випробування трубопроводу буде виявлено витік робочого середовища, тиск має бути знижений до 100-500 Па і вжиті заходи з ліквідації витоку.

11.10 Після закінчення ремонтних робіт треба оформити акт в якому зазначити таку інформацію:

- назва організації замовника;
- назва організації виконавця;
- прізвища керівника, працівників, які виконують ремонтні роботи;
- назва трубопроводу;
- назва ремонтної ділянки;
- діаметр, номінальна товщина стінки та марка сталі трубопроводу;
- пікетна відмітка місця під'єднання до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту;
- пікетна відмітка місця ремонтного дефекту;
- вид та розміри дефекту;
- дата та час виконання ремонтних робіт;
- температура довкілля під час ремонту;
- дані про застосовані матеріали (рукав, термореактивна смола, ізоляція тощо);
- час витримання притиснутого ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу;
- відомості щодо результатів внутрішньотрубного відеоконтролю якості встановлення ремонтного бандажу;

- відомості щодо результатів випробування відремонтованої ділянки трубопроводу;
- підписи відповідальних за виконання ремонтних робіт.

12 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ВИКОНАННЯ РОБІТ

12.1 Під час протягування байпасним поршнем ремонтної системи трубопроводом до місця локального дефекту стінки труби треба контролювати тиск у запоршневому просторі (різке збільшення тиску може свідчити про застрягання поршня або завершення процесу протягування).

12.2 Після протягування байпасним поршнем ремонтної системи трубопроводом до місця локального дефекту стінки труби (якщо гнучка трубка з барабану повістю розмотана) рекомендовано виконати контроль місцезнаходження байпасного поршня. Для цього з протилежного кінця ремонтного трубопроводу проштовхнути чи запустити в нього пристрій для внутрішньотрубного відеоогляду.

12.3 Під час внутрішньотрубного встановлення ремонтного бандажу в місці локального дефекту трубопроводу треба контролювати:

- тиск у еластичній оболонці під час витримування притиснутим нею ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу. Тиск повинен бути в межах від 0,9 кгс/см² до 1,0 кгс/см²;

- температуру повітря на виході повітряного нагнітача із нагрівачем (якщо температура буде занадто низькою, процес затвердіння затягнеться, що може вплинути на якість ремонту. Занадто висока температура може спричинити передчасне затвердіння смоли і погіршити адгезію рукава до стінок труби);

- час витримування притиснутого ремонтного бандажу до внутрішньої стінки трубопроводу (може складати від 30 хв до декількох годин залежно від типу смоли, температури довкілля, товщини нанесеного шару. У разі застосування повітряного нагнітача із нагрівачем від 10 хв до 30 хв).

12.4 Під час внутрішньотрубного відеоконтролю якості встановлення ремонтного бандажу в місці локального дефекту трубопроводу треба виявляти:

- відшарування ремонтного бандажу від внутрішньої стінки труби;
- зморшки;
- гофри.

12.5 Контроль якості зварювальних робіт піз час монтажу котушки у місці, де здійснювалось під'єднання до трубопроводу обладнання для виконання внутрішньотрубного ремонту локального дефекту треба виконувати відповідно до вимог ДБН А.3.1-5, ДСТУ-Н Б А.3.1-26, ВСН 012:

- контролем якості зварювальних матеріалів;
- контролем якості зачистки кромок, що будуть зварюватися і поверхонь, що прилягають до них;
- систематичним операційним контролем в процесі зварювання;
- візуальним оглядом і обмірюванням зварювальних з'єднань;
- перевірянням зварних швів неруйнівними методами.

12.6 У процесі зварювання треба контролювати очистку від шламу і бризок роз-плавленого металу, відсутність поверхневих дефектів кожного шару зварного шва.

12.7 Під час візуального огляду зварного шва треба перевіряти його рівномірність усією довжиною та відсутність грубої лускатості поверхні шва (перевищення гребеня над западиною повинно бути не більше ніж 1 мм).

12.8 Контроль якості ізоляції треба виконувати відповідно до вимог ВСН 012.

13 ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ

13.1 Під час виконання підготовчих і основних робіт із внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби важкодоступних ділянок трубопроводів встановленням ремонтного бандажу треба дотримуватись вимог безпеки і охорони довкілля відповідно до НПАОП 11.1-1.01, НПАОП 0.00-1.73, НПАОП 0.00-1.81-18, НАПБ А.01.001, керуватися інструкціями з техніки безпеки, що діють у операторів трубопровідних систем.

13.2 Вимоги безпеки повинні відповідати:

- під час виконання робіт із застосуванням ручного дугового зварювання, ацетилено-кисневого різання – НПАОП 11.1-1.01, НПАОП 0.00-5.11, НПАОП 28.52-1.31;

- під час виконання механічної обробки металів різанням – НПАОП 0.00-1.71;

- під час виконання вантажно-розвантажувальних робіт та переміщенні вантажів – НПАОП 0.00-1.80;

- під час виконання робіт із використанням ручного електричного інструменту – НПАОП 40.1-1.21, НПАОП 0.00-1.71;

- під час виконання робіт із використанням абразивного інструменту – НПАОП 0.00-1.71;

- під час виконання технологічних операцій із випорожнення, продування газопроводу – НПАОП 11.1-1.01, НПАОП 0.00-5.11.

13.3 Роботи з випорожнення газопроводу перед виконанням ремонтних робіт, продування газопроводу після їх завершення є газонебезпечні і їх мають виконувати не менше ніж два працівники під керівництвом відповідальної особи з записом у журналі виконання газонебезпечних робіт без наряду-допуску.

13.4 Роботи із внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби важкодоступних ділянок трубопроводів встановленням ремонтного бандажу треба виконувати за затвердженим планом організації робіт під безпосереднім керівництвом керівника.

13.5 На кранах, якими перекрито ремонтвану ділянку трубопроводу, мають бути вивішені таблички з написом "Не відкривати" та передбачені заходи для запобігання самовільному їх відкриванню.

13.6 Під час виконання робіт з очищення зовнішньої поверхні трубопроводу від ізоляційного покриття треба користуватися респіраторами (або марлевими пов'язками) і мати запобіжні окуляри.

13.7 Вирізання катушки труби у місці монтажу герметичної камери та приймання байпасного поршня треба виконувати тільки після випорожнення трубопроводу.

13.8 Заборонено залишати розгерметизований трубопровід без догляду.

13.9 Під час роботи з термореактивною смолою та ізоляційними матеріалами усі види робіт треба виконувати у гумових рукавичках. При цьому заборонено паління та інше застосування відкритого вогню.

13.10 У разі попадання термореактивної смоли або інших клейких матеріалів на відкриті ділянки тіла вони повинні бути зняті тампоном, змоченим у бензині, а тоді промиті водою з милом.

13.11 Під час виконання ремонтних робіт увесь персонал, який приймає безпосередню участь у їх виконанні, повинен бути забезпечений спецодягом та засобами індивідуального захисту відповідно до вимог ДСТУ 7239, НПАОП 0.00-7.17.

13.12 У разі виконання ремонтних робіт у зимову пору року персонал повинен бути забезпечений утепленням спецодягом і спецвзуттям.

13.13 Роботи мають виконувати особи не молодші 18 років, які мають необхідну кваліфікацію, пройшли спеціальне навчання, інструктаж і перевірку знань із питань охорони праці відповідно до НПАОП 0.00-4.12.

13.14 Перед початком виконання робіт керівник робіт від організації замовника повинен провести інструктаж бригаді організації виконавця із питань охорони праці, уточнити особливості ремонтної ділянки трубопроводу (характеристики перекачуваного продукту, ремонти тощо), ознайомити з чинними в даній організації та в галузі документами і інструкціями яких треба дотримуватись під час виконання робіт.

13.15 Організація замовника в особі відповідальних представників несе відповідальність за дотримання правил охорони праці під час виконання усіх робіт. Персонал, у тому числі персонал організації виконавця, задіяний у ремонтних роботах має весь час перебувати під контролем та керівництвом відповідального представника організації замовника.

ДОДАТОК А
(довідковий)
БІБЛІОГРАФІЯ

1 МУ 34-70-149-86. Методичні вказівки з проведення шурфовок в теплових мережах.

2 Методика виготовлення дослідних зразків очисних поршнів і визначення їх фізико-механічних характеристик, затверджено ректором Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу 24.11.2023 р.

3 Технологічна інструкція з внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів, затверджено ректором Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу 24.05.2024 р.

ДОДАТОК В

АКТ ТА ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ КИЇВРАДИ (КИЇВСЬКОЇ МІСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ) «КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО» СТРУКТУРНИЙ ПІДРОЗДІЛ «КИЇВСЬКІ ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ» РТМ «ПЕЧЕРСЬК»

вул. Товарна, 1 м. Київ, Україна, 01033, тел. 287-80-28, факс 529-44-21

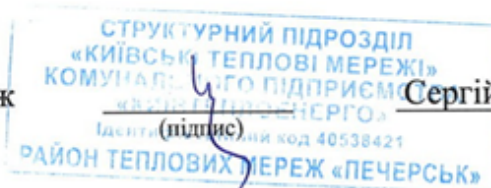
21.11.2025 № 9/175

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результати дисертаційного дослідження аспіранта Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Бондаренка Роберта Вікторовича на тему: “Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж” на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 – “Нафтогазова інженерія та технології” впроваджені в діяльності СП “Київські теплові мережі” КП “КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО” РТМ “Печерськ”.

Зокрема, з метою внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби на важкодоступних ділянках теплових мереж використано аналітичні, експериментальні матеріали щодо доставки байпасним поршнем ремонтної системи сталевим трубопроводом до важкодоступного місця (технологія “Тяговий поршень[®]”). Технічним результатом застосування такої технології є можливість виконання ремонтних робіт у важкодоступному місці трубопроводу, зокрема за трійником, крутовигнутим відводом, зниження витрат на ремонтні роботи, незначний обсяг або відсутність земляних робіт, мінімізація часу простою трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах і зменшення впливу ремонтних робіт на довкілля, інфраструктуру та благоустрій.

Начальник району теплових мереж



Сергій ТИМОШЕНКО

(ім'я, прізвище)

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Головний інженер РТМ "Печерськ"
 КОМУНАЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА
 «КИЇВСЬКІ ТЕПЛОВІ МЕРЕЖІ»
 Костянтин СВИТЕЛЬСЬКИЙ
 (підпис) (ім'я, прізвище)
 «27» листопада 2025 року
 М.П.

АКТ

Комісія у складі:

голови – начальник РТМ "Печерськ" Тимошенко Сергій Володимирович;
 членів комісії: – старший майстер АВД 5 Герасименко Олександр Сергійович;
 – бухгалтер Колісник Світлана Григорівна

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження аспіранта Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Бондаренка Роберта Вікторовича на тему: "Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж" на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 – "Нафтогазова інженерія та технології" впроваджені в діяльності СП "Київські теплові мережі" КП "КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО" РТМ "Печерськ".

Зокрема, з метою внутрішньотрубного ремонту локальних дефектів стінки труби на важкодоступних ділянках теплових мереж використано аналітичні, експериментальні матеріали щодо доставки байпасним поршнем ремонтної системи сталевим трубопроводом до важкодоступного місця (технологія "Тяговий поршень^Б"). Технічним результатом застосування такої технології є можливість виконання ремонтних робіт у важкодоступному місці трубопроводу, зокрема за трійником, крутовигнутим відводом, зниження витрат на ремонтні роботи, незначний обсяг або відсутність земляних робіт, мінімізація часу простою трубопроводу, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах і зменшення впливу ремонтних робіт на довкілля, інфраструктуру та благоустрій.

Голова комісії начальник РТМ "Печерськ"
 (посада)

(підпис)

Сергій ТИМОШЕНКО
 (ім'я, прізвище)

Члени комісії старший майстер АВД 5
 (посада)

(підпис)

Олександр ГЕРАСИМЕНКО
 (ім'я, прізвище)

бухгалтер
 (посада)

(підпис)

Світлана КОЛІСНИК
 (ім'я, прізвище)

ДОДАТОК Г

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел./факс (0342) 54-71-39,
тел. (0342) 54-72-66 e-mail: admin@iung.edu.ua

Код ЄДРПОУ 02070855



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

д.т.н., проф.

Олександр КОНДРАТ

Вересня

2025 р.

АКТ

Впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи Бондаренка Р. В. “Розроблення технології внутрішньотрубного ремонту важкодоступних ділянок трубопровідних мереж”.

У результаті роботи над дисертацією аспірант кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв Бондаренко Роберт Вікторович одержав наукові та прикладні результати, які використовуються для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня магістр та доктор філософії за спеціальністю 185 – “Нафтогазова інженерія та технології” під час вивчення дисциплін “Прогресивні технології буріння свердловин, видобування, транспортування та зберігання енергоносіїв” (рівень магістр), “Інноваційні технології безтраншейного відновлення та локального ремонту трубопровідних систем” (рівень доктор філософії) та під час виконання магістерських робіт за освітньо-професійними програмами “Магістральний трубопровідний транспорт”, “Розподіл та постачання енергоносіїв”.

Директор інституту
нафтогазової інженерії,
к.т.н., доцент

Володимир БОГОСЛАВЕЦЬ

Завідувача кафедри
транспортування та зберігання
енергоносіїв,
д.т.н., професор

Василь ЗАПУХЛЯК