



**А. О. Кичма, Р. Я. Предко, Ю. Я. Новіцький**

*Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна*

## МЕТОДИКА РЕМОНТУ ОПОРНИХ ВУЗЛІВ НАДЗЕМНИХ ДІЛЯНОК МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОБІЛЬНИХ ПІДІЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Здійснено огляд останніх досліджень щодо безпечної експлуатації та раціональних сучасних технологій ремонту опорних вузлів надземних ділянок тривало експлуатованих магістральних газопроводів (МГ), які пролягають через водні перешкоди чи заболочені ділянки. Встановлено, що використання під час ремонту надземних переходів МГ, що пролягають через русла річок і заболочені ділянки, гусеничних трубоукладачів і великовантажних підіймальних кранів, значно погіршують екологію навколишнього середовища і збільшують сумарні матеріальні затрати за виконані роботи. Запропоновано технологію ремонту опорних вузлів надземних ділянок МГ без зупинки транспортування газу за допомогою мобільних підіймальних пристроїв. Використання розробленої конструкції мобільного підіймального пристрою і запропонованої методики проведення ремонту опорних вузлів надземних ділянок тривало експлуатованих МГ за допомогою переносних підіймальних пристроїв дає змогу виконувати ремонтні роботи без зупинки транспортування газу і зменшити шкідливий вплив на довкілля. Використовуючи метод скінченних елементів побудовано математичну модель з визначення напружено-деформованого стану елементів опорного вузла МГ і складових підіймального пристрою. Сформульовано рекомендації щодо оптимальних розмірів деталей мобільного підіймального пристрою і технологічних параметрів виконання ремонтно-відновлювальних робіт опорних вузлів надземних ділянок МГ. Отримані математична модель та графічні залежності показують, що збільшення відхилення положення трубопроводу від проєктного призводить до перерозподілу сумарних реакцій на опорних вузлах. Результати проведених досліджень дають змогу покращити ефективність регулювання взаємного положення елементів опорних вузлів ділянок МГ на надземних переходах.

**Ключові слова:** трубопровід; гідроциліндри; вантажозахопний пристрій; рухома і нерухома опори; комп'ютерна модель; метод скінченних елементів.

### Вступ / Introduction

Магістральні газопроводи (МГ) віднесено до об'єктів довготривалої експлуатації підвищеної небезпеки. Фактично МГ – це резервуар, який наповнений газом під тиском 5-7 МПа, що простягається на сотні кілометрів. Правила тривалої експлуатації МГ суворо зумовлені низкою нормативних документів [12]. У процесі довготривалої експлуатації МГ, на їх окремих ділянках, що пролягають через водні перешкоди (рис. 1,а) та заболочені місця (рис. 1,б), можуть проходити інтенсивні корозійні процеси і з'являтися локальні дефекти, зокрема і під хомутами опорних вузлів. Тому для МГ тривалої експлуатації необхідно періодично контролювати їх технічний стан і за потреби виконувати ремонтно-від-

новлювальні роботи опорних вузлів надземних переходів. Основними параметрами, які істотно впливають на збільшення напружено-деформованого стану надземних ділянок МГ у процесі тривалої експлуатації, є зміна їх просторового положення, зменшення залишкової товщини стінки труб, наявність залишкових напружень як в основному металі труб, так і в зоні поздовжніх і кільцевих зварних швів, експлуатаційна деградація металу труби тощо.

Проблеми ремонту опорних вузлів МГ тривалої експлуатації, без припинення транспортування газу, на надземних переходах через водні перешкоди (див. рис. 1,а) чи заболочені ділянки (див. рис. 1,б) вимагають різних теоретичних і експериментальних досліджень. Вантажопідіймальна техніка (автомобільні крани чи

### Інформація про авторів:

**Кичма Андрій Олексійович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра технічної механіки та динаміки машин.

Email: [akychma@gmail.com](mailto:akychma@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-0339-4100>

**Предко Ростислав Ярославович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра технічної механіки та динаміки машин.

Email: [predko.rostuslav@gmail.com](mailto:predko.rostuslav@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-2040-8911>

**Новіцький Юрій Ярославович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування.

Email: [iurii.novitskyi@gmail.com](mailto:iurii.novitskyi@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0003-3586-9366>

**Цитування за ДСТУ:** Кичма А. О., Предко Р. Я., Новіцький Ю. Я. Методика ремонту опорних вузлів надземних ділянок магістральних газопроводів з використанням мобільних підіймальних пристроїв. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 3. С. 55–60.

**Citation APA:** Kychma, A. O., Predko, R. Ya., & Novitskyi, Yu. Ya. (2022). Repair technique of supporting units of above-ground segments of gas pipelines using mobile lifting devices. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 55–60. <https://doi.org/10.36930/40320309>

трубоукладачі) не може переміститися до опори балкового переходу, що розміщена у важкодоступних місцях, наприклад, безпосередньо у руслі ріки чи на заболочених ділянках, без коштовних підготовчих робіт з облаштування під'їзних шляхів і додаткових монтажних майданчиків. Оцінка технічного стану опорних конструкцій тривало експлуатованих МГ є важливим показником, який зумовлює безпечну і надійну експлуатацію усієї газотранспортної системи. Запропонована методика проведення контролю технічного стану і ремонту опорних вузлів МГ без зупинки транспортування газу забезпечить їх надійну тривалу експлуатацію.



**Рис. 1.** Перехід надземної ділянки МГ через: а) русло річки; б) заболочені ділянки / Overpasses of the above-ground segments of the pipeline: а) across riverbed; б) over wetlands

*Об'єкт дослідження* – опорні вузли надземних ділянок магістральних газопроводів, що пролягають через водні перешкоди та заболочені ділянки.

*Предмет дослідження* – удосконалення методики ремонту й оцінки напружено-деформованого стану опорних вузлів надземних ділянок магістральних газопроводів з корозійними дефектами з використанням мобільних підймальних пристроїв.

*Мета роботи* – забезпечити міцність довгомірних надземних ділянок тривало експлуатованих магістральних газопроводів з урахуванням виявлених корозійних дефектів і локальних навантажень, зумовлених взаємодією трубопроводу з роликками вантажозахопного пристрою.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- удосконалити конструкцію мобільного підймального пристрою і технологію ремонту опорних вузлів надземних ділянок магістральних газопроводів без зупинки транспортування газу;
- побудувати комп'ютерну модель контактної взаємодії трубопроводу як довгомірної циліндричної оболонки з опорни-

ми роликками вантажозахопного пристрою підйомника для визначення параметрів напружено-деформованого стану трубопроводу методом скінченних елементів;

- розробити технологію ремонту опорних вузлів надземних переходів МГ із зовнішнім діаметром у діапазоні 529-1420 мм.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У межах виконання цільової програми НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" у 2013-2015 рр. здійснено технічну діагностику 20 надземних переходів МГ балкового типу, які розташовані на території Карпатського регіону [11]. Виявлено низку відхилень дійсного положення надземних ділянок МГ від їх проектного положення. Автори [3] отримали формули для розрахунку кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених проблемних ділянок магістральних трубопроводів від дії внутрішнього тиску. Результати виконаних розрахунків показують, що для трубопроводу зовнішнім діаметром  $D = 1420$  мм, номінальною товщиною стінки  $h = 24$  мм за тиску  $p = 5$  МПа, зменшення товщини стінки на 6 мм внаслідок ерозійного чи корозійного зношування призводить до збільшення номінальних кільцевих напружень на 34 %. Технічний стан наявних елементів опорних вузлів надземних переходів у трубопроводному транспорті проаналізовано у праці [5], в якій оцінено додаткові експлуатаційні навантаження, які виникають у надземних ділянках різних магістральних трубопроводів під час зміщення опорних вузлів, що може призвести до руйнування залізобетонного ригеля.

Проблеми опорних конструкцій надземних ділянок нафтогазопроводів тривалої експлуатації проаналізували автори [7] і сформулювали рекомендації щодо мінімізації впливу виявлених відхилень і пошкоджень елементів опорних вузлів на їх подальшу безаварійну роботу. У праці [13] автори розробили математичні моделі для розрахунку напружено-деформованого стану та міцності ділянки магістрального трубопроводу під час виконання робіт із його заглиблення, шляхом опускання до проектної глибини. Результати моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених ділянок тривало експлуатованого МГ із зовнішнім діаметром 1220 мм за допомогою програми SolidWorks Simulation проаналізовано в праці [9]. На основі проведених досліджень автор запропонував виконувати ремонт ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводних систем у важкодоступних місцях способом протягування поршнем додаткового рукава чи гнучкої композитної труби [2]. Автори [10] розробили методику виконання підготовчих, ремонтно-відновлювальних і заключних робіт під час ремонту ділянок трубопроводів, розташованих на опорах балкових переходів. Рекомендації з ефективного створення твердотільних моделей у взаємодії з програмним комплексом SolidWorks Simulation подано у праці [1]. Спосіб проведення діагностики і технологія ремонту опорних вузлів надземних ділянок тривало експлуатованих МГ за допомогою мобільних підймальних пристроїв наведено в [8]. На основі даних, отриманих під час проведення діагностики проблемних ділянок трубопроводів і результатів розрахунків залишкової міцності, виконаних згідно з нормативним документом [4], розробляють рекомендації з технології їх ремонту, заміни чи зміцнення небезпечних ділянок МГ.

**Матеріали та методи дослідження.** Надземні ділянки тривало експлуатованих МГ – це складні просто-

рові рамно-оболонкові конструкції, які містять в собі трубопроводи з компенсаторами, залізобетонні палі, що з'єднані залізобетонним ригелем, на якому встановлена опорна плита з роликками. При цьому значні габарити, коливання температури, вплив навколишнього середовища, швидкість потоку транспортованого продукту, вітрові навантаження та непостійність цих параметрів у часі призводять до того, що такі конструкції працюють за дуже складних умов. Під час тривалої експлуатації МГ, на його окремих ділянках, що пролягають через пойми річок та заболочені ділянки, можуть відбуватися інтенсивні корозійні процеси і з'являтися локальні корозійні і тріщиноподібні дефекти, зокрема як на відкритих ділянках трубопроводу, так і під хомутами опорних вузлів. Згідно з Правилами технічної експлуатації МГ такі ділянки є потенційно небезпечними і їх періодично необхідно обстежувати і за потреби виконувати діагностичні та ремонтно-відновлювальні роботи.



Рис. 2. Установка мобільного підйимального пристрою на опори МГ / Installation of a mobile lifting device on the support of the pipeline

Для можливості здійснення діагностичних обстежень і виконання ремонтних робіт опорних вузлів на важкодоступних надземних ділянках ми запропонували методику і спосіб її реалізації [8]. На рис. 2 показано установку мобільного підйимального пристрою, яка змонтована на залізобетонному ригелі опори МГ. На рис. 3 зображено конструктивну схему рухомої опори МГ з мобільним підйимальним пристроєм, де: 1 – залізобетонний ригель опори, 2 – сідловина опори, 3 – опорна плита, 4 – рухомі ролики, 5 – ділянка трубопроводу, 6 – гідроциліндри, 7 – подовжувачі до гідроциліндрів, 8 – вантажозахопний пристрій, 9 – металева підкладка.

Підймання трубопроводу здійснюють так. Спочатку виконують підготовчі роботи з демонтажу опори балкового переходу згідно з проектом виконання робіт (ПВР). Після чого на залізобетонному ригелі опори 1 монтують гідроциліндри 6 симетрично, до повздовжньої осі ділянки трубопроводу 5 (див. рис. 2 і 3). Залежно від діаметра трубопроводу на гідроциліндри встановлюють подовжувачі 7 (потрібної довжини), на які монтують вантажозахопний пристрій 8 з металевою підкладкою 9, яка підтримується внаслідок її притискання вантажозахопним пристроєм до нижньої ділянки трубопроводу. Металева підкладка вибирають залежно від зовнішнього діаметра трубопроводу і встановлюють симетрично відносно повздовжньої осі вантажозахопного пристрою. Після чого подають робочу рідину в гідроциліндри. Рідина в циліндри подається гідравлічною пом-

пою, яка приводиться в дію від компресора або балона із стиснутим повітрям. Внаслідок цього трубопровід 1 підіймається на обґрунтовану безпечну висоту, отриману згідно з розрахунками, наведеними в ПВР. За допомогою дерев'яних брусків фіксують піднятий трубопровід у цьому положенні. Проводять демонтаж пів хомутів і каретки з сідловиною. Після цього здійснюють комплексні обстеження раніше закритої поверхні труби (наявність тріщиноподібних чи корозійних дефектів на поверхні трубопроводу, визначають залишкову товщину стінки труби і твердість її металу тощо).

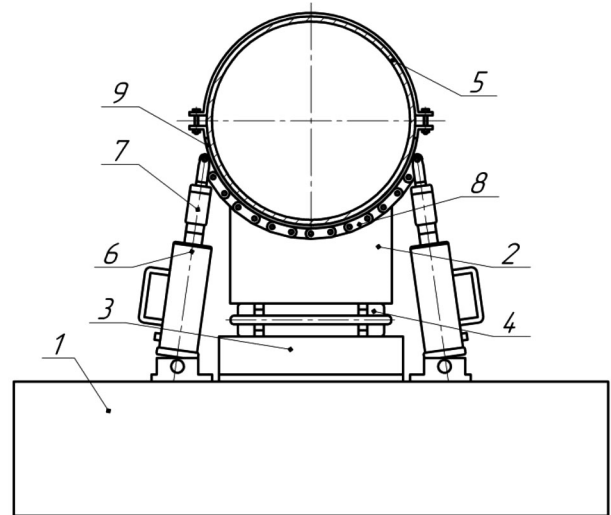


Рис. 3. Конструктивна схема рухомої опори МГ з мобільним підйимальним пристроєм / Structural diagram of the movable support of the pipeline with a mobile lifting device

Як засвідчила практика тривалої експлуатації, на елементи МГ надземних переходів діють статичні і динамічні навантаження, які виникають від погонної ваги трубопроводу і його пружного згину у вертикальній і горизонтальній площинах, пульсації тиску газу, температурних і вітрових навантажень. Для дослідження технічного стану таких складних просторових конструкцій можна використати такі рівняння, записані у матричній формі:

- рівняння статичної рівноваги елементів системи

$$\{r\} = [C]^{-1}\{R\}; \quad (1)$$

- рівняння руху для дослідження динамічних явищ елементів опорних вузлів МГ

$$[M]\{\ddot{r}\} + [K]\{\dot{r}\} + [C]\{r\} = \{R\}, \quad (2)$$

де:  $\{r\}$  – вектор переміщень вузлів елементів МГ;  $\{R\}$  – вектор зовнішніх сил, що діють на конструкцію надземного переходу;  $[C]$  – матриця жорсткостей;  $[M]$  – матриця мас;  $[K]$  – матриця лінійного затухання.

Власні частоти механічної системи надземної ділянки переходу визначаємо з умови перетворення у нуль визначника системи рівнянь руху (2)

$$\det[K - \omega_i^2 M] = 0, \quad (3)$$

де  $\omega_i$  – власні частоти системи.

Для комплексного розрахунку елементів надземних ділянок МГ застосували метод скінченних елементів (МСЕ), який реалізували в програмному середовищі SolidWorks Simulation [1]. Використання МСЕ вдало поєднує матричне представлення основних рівнянь рівноваги і руху зі застосуванням комп'ютерної техніки для їх розв'язання. Під час розроблення математичних моде-

лей застосовували плоскі або об'ємні елементи типу PIPE, BEAM, TRIANG, SHELL, SOLID та ін. Континуальна суцільна конструкція замінювалась сукупністю скінченних елементів, з'єднаних між собою у вузлах остаточною кількістю жорстких зв'язків. Диференціальні рівняння дійсної системи приводили до системи алгебраїчних рівнянь, яка відповідає числу ступенів вільності всієї ідеалізованої системи. Для цього всередині зони кожного дискретного елемента задавали розподіл узагальнених переміщень чи напружень або ж сумісний розподіл переміщень і напружень. Істотним є вибір оптимального числа елементів і кількості вузлів так, щоб забезпечити достатню точність розрахунків, а також виявлення оптимального числа ітерацій. Визначивши вектор переміщень вузлів елементів, використовуючи узагальнений закон Гука, знаходили розрахункові напруження і порівнювали з допустимими напруженнями.

Під час формування вхідних параметрів запропонованого програмного забезпечення враховували: дійсне планово-висотне положення елементів надземного переходу МГ; зміну тиску газу в газопроводі за період між обстеженнями; можливу зміну механічних характеристик металу труби; температуру трубопроводу, за якої здійснювали обстеження, і температуру навколишнього середовища, за якої зварювали останній кільцевий зварний шов. На основі проведених розрахунків оцінюємо напружено-деформований стан (НДС) окремих ділянок надземного переходу МГ і порівнюючи їх з допустимими значеннями визначаємо найнебезпечніші ділянки надземного переходу та розробляємо рекомендації щодо зниження рівня НДС на найнебезпечніших ділянках МГ.

Оскільки планово-висотне положення трубопроводу надземного переходу має складну форму, то для створення твердотільної моделі надземної ділянки МГ сформований алгоритм на основі об'єктно-орієнтованого принципу, який дає змогу автоматизувати побудову просторового положення надземних переходів, використовуючи координати геодезичних вимірювань. Запропонована програма має високу ефективність та швидкодію, що дає змогу оперативно здійснювати багатоваріантні дослідження.

Використання програмного забезпечення SolidWorks Simulations дає змогу визначити НДС елементів надземної ділянки МГ і елементів підйимального пристрою, здійснювати їх розрахунки на статичну та динамічну міцність та знаходити власні частоти і їх форми.

Моделювання ділянки газопроводу виконували за умови, що труба одночасно є елементом будівельної конструкції, на яку діють вертикальні і горизонтальні навантаження від власної ваги, ваги транспортованого продукту, снігу, вітру, зміни температури та технологічним елементом, що зазнає дії внутрішнього тиску. При цьому враховували дійсне планово-висотне положення трубопроводу, яке було визначено на основі натурного експерименту. Навантаження, що діють на розглянутий трубопровід, приймали у найбільш невідповідних можливих комбінаціях чинників, що закладені в процесі будівництва і експлуатації МГ.

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для дослідження НДС надземної ділянки МГ у процесі ремонтних робіт, з використанням мобільних підйимальних пристроїв, створено в програмному середо-

вищі SolidWorks Simulation твердотільну модель. Порівняно з іншими системами аналогічного рівня, SolidWorks Simulation має ширші можливості для створення і редагування великогабаритних просторових об'єктів, що дає змогу ефективно використовувати програму для моделювання, ділянки надземного переходу під час ремонтних робіт. На рис. 4 зображено твердотільну модель ділянки МГ з її опорним вузлом. Сітка скінченних елементів складається із множини об'ємних елементів – тетраедрів, які моделюють як зовнішню, так і внутрішню поверхню оболонки. Під час розбивання трубопроводу на сітку скінченних елементів, розміри яких будуть в декілька разів меншими за товщину стінки труби, отримуємо проміжні точки всередині її стінки.

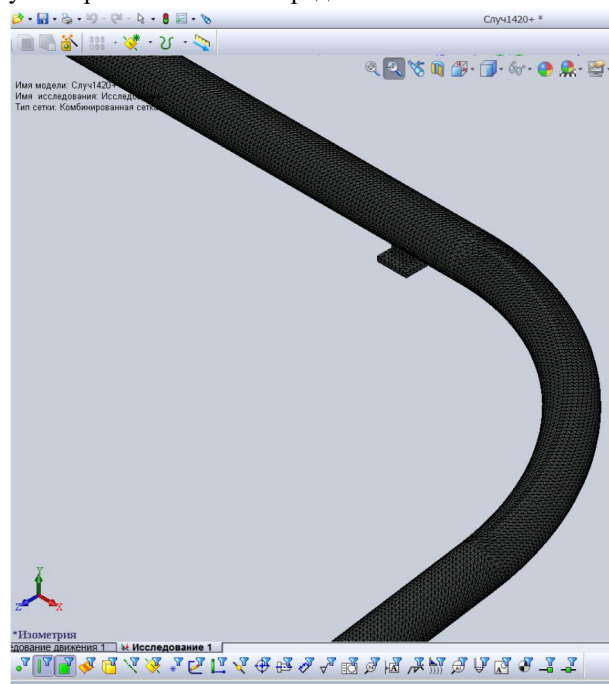
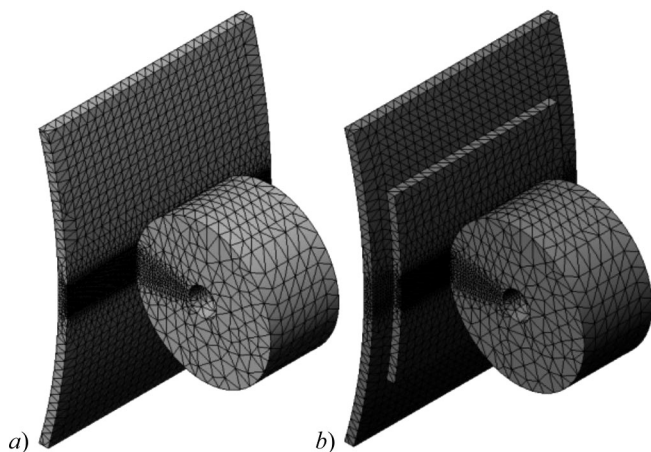


Рис. 4. Фрагмент твердотільної моделі ділянки МГ з її опорним вузлом / The fragment of a solid-state model of a pipeline segment with its support node

Розрахункову модель контактної взаємодії циліндричної поверхні ділянки трубопроводу із зовнішньою поверхнею ізотропних роликів вантажозахопного пристрою, розбиту на сітку скінченних елементів у формі тетраедрів високої якості, зображено на рис. 5. На рис. 5,а розглянуто варіант без розміщення підкладки між циліндричною поверхнею труби і роликом, а на рис. 5,б – відповідно з підкладкою, яка розміщена між циліндричною поверхнею труби і роликом вантажозахопного пристрою. Розрахунки показують, що під час підймання ділянки труби питомий тиск за довжиною ділянки контакту циліндричної поверхні трубопроводу з роликом вантажозахопного пристрою розподілений нерівномірно. Проведені дослідження показали, що залежно від товщини встановленої підкладки між циліндричною поверхнею труби і роликом вантажозахопного пристрою нерівномірність питомого тиску між їх контактними поверхнями зменшується на 20-35 %.

Процедуру виконання ремонту опорних вузлів надземних переходів МГ здійснюють так. На основі технічного завдання на ремонт надземного переходу та просторового положення трубопроводу, визначеного за допомогою геодезичних методів, створюють розрахункову модель і обґрунтовано назначають граничні умови,

за яких експлуатується це обладнання. Будують твердотільну модель об'єкта, на базі якої у SolidWorks Simulation генерується сітка скінченних елементів.

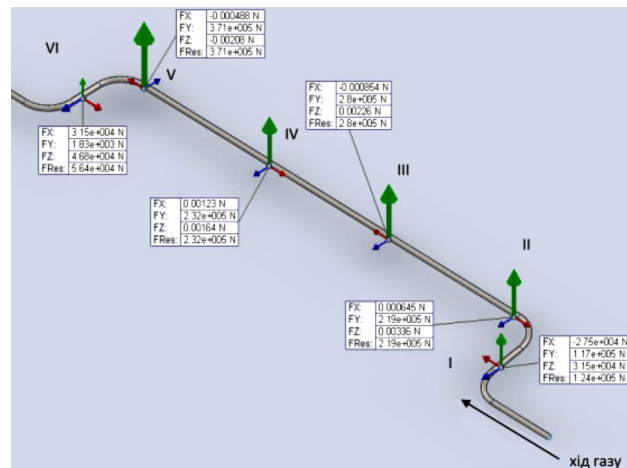


**Рис. 5.** Твердотільна модель контактної взаємодії циліндричної поверхні ділянки трубопроводу і ролика вантажозахопного пристрою / Solid model contact interaction of the cylindrical surface of the pipeline section and the roller of the load-grabbing device: a) – без металевої підкладки / without metal substrate; b) – з металевою підкладкою / with a metal substrate

Для прикладу розглянуто надземний перехід МГ Ду 1420 через річку Случ, який експлуатується з 1990 р. Цей надземний перехід МГ виконано за схемою двоконсольної балки з Г-подібними компенсаторами. Для збільшення жорсткості металоконструкції надземного переходу на ділянках входу і виходу трубопроводу з ґрунту було здійснено обвалування. Конструктивно перехід включає Г-подібні компенсатори і шість опор: перша і шоста опори нерухомі, друга, третя, четверта і п'ята – рухомі опори. Для зменшення необхідної вантажопідйомності під час підймання крайніх опор № 1 і 6 проводили розкопування ділянки виходу труби із ґрунту і входу труби у ґрунт. Надземний перехід виконано із труб діаметром 1420×18,7 мм, виготовлених із сталі марки Х70. Згідно із сертифікатом, матеріал труб має такі механічні характеристики: мінімальне значення границі міцності:  $\sigma_b = 588$  МПа; границі текучості  $\sigma_m = 501$  МПа, відносне видовження  $\epsilon = 32$  %. Із протоколу обстеження МГ Ду1420 через річку Случ мінімальна залишкова товщина стінки труб на ділянці надземного переходу дорівнювала 16,2 мм.

Розподіл значень потрібної вантажопідйомності підймального пристрою під час виконання ремонтних робіт на надземному переході МГ Ду 1420 через річку Случ наведено на рис. 6. Згідно з отриманими у програмному середовищі SolidWorks Simulation розрахунками, значення вантажопідйомності підймального пристрою на опорах надземного переходу під час ремонтно-відновлювальних робіт становили:  $R_{y1} = 1,24 \cdot 10^5$  Н;  $R_{y2} = 2,19 \cdot 10^5$  Н;  $R_{y3} = 2,8 \cdot 10^5$  Н;  $R_{y4} = 2,32 \cdot 10^5$  Н;  $R_{y5} = 3,71 \cdot 10^5$  Н;  $R_{y6} = 5,64 \cdot 10^4$  Н.

Розрахунки НДС ділянки надземного переходу проводили за таких параметрів: тиск газу в трубопроводі  $p=3,5$  МПа; різниця температур, за яких виконували зварювання замикального кільцевого шва і температурою навколишнього середовища в день проведення ремонтних робіт, яка становила 10 °С; модуль пружності для сталі  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,3$ ; нормативне навантаження від власної ваги труби  $q_{тр}=6220$  Н/м; вага сідловини з хомутами  $F_c=870$  кг.



**Рис. 6.** Розподіл значень вантажопідйомності підймального пристрою на опорах надземного переходу під час виконання ремонтних робіт / Distribution of lifting capacity values on overpass supports during repair works

Зважаючи на отриманий розподіл НДС трубопроводу рекомендуємо проводити ремонт опорних вузлів МГ за тиску газу до 3,5 МПа і висоти піднімання трубопроводу до 80 мм.

Залежність еквівалентних напружень, які виникають на розкопаній ділянці трубопроводу, суміжній з Г-подібним компенсатором при вході та виході з ґрунту та необхідну при цьому вантажопідйомність підймального пристрою наведено у таблиці.

**Таблиця.** Залежність силових факторів від висоти піднімання трубопроводу і довжини ділянки його розкопування при вході у ґрунт чи виході із ґрунту / Dependence of force factors on the height of the pipeline and the length of its excavation at the entrance to the ground or out of the ground

| Величина підйому трубопроводу (мм) | Еквівалентні напруження (МПа) / Необхідна вантажність підймального пристрою (кН) |                        |                        |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                    | Труба не розкопана                                                               | Труба розкопана на 3 м | Труба розкопана на 5 м |
| 40                                 | 169/124                                                                          | 155/119                | 149/107                |
| 80                                 | 251/167                                                                          | 206/138                | 196/124                |

Із результатів, наведених в таблиці, видно, що завдяки розкопуванню входу трубопроводу у ґрунт чи його виходу із ґрунту на довжину до 5 м можна зменшити напруження в трубі та необхідну вантажопідйомність підймального пристрою на 22-25 %.

При цьому оцінку залишкової міцності ділянок МГ з дефектами виконуємо за алгоритмом, який складений на основі критерію статичної міцності, що базується на двокритеріальному підході зі застосуванням діаграми оцінки руйнування (ДОР), за якою можна оцінювати два граничних стани: крихкого та в'язкого руйнування [4].

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати таку наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – побудовано комп'ютерну модель контактної взаємодії надземної ділянки газопроводу як довгомірної циліндричної оболонки з опорними роликками вантажозахопного пристрою та досліджено вплив їх різних конструктивних параметрів на напружено-деформований стан технологічного обладнання, як у разі безпосередньої взаємодії роликів з трубопроводом, так і під час їх взаємодії через концентричні металеві підкладки.

*Практична значущість результатів дослідження* – за результатами проведених досліджень створено й ап-

робовано Технологічну інструкцію з піднімання ділянки магістральних газопроводів на опорах надземних переходів балкового типу під час виконання ремонтних робіт.

## Висновки / Conclusions

Використання запропонованої методики виконання ремонту опорних вузлів надземних ділянок МГ на переходах через водні перешкоди і заболочені ділянки за допомогою розробленого мобільного пристрою дає змогу скоротити час і витрати на виконання ремонтно-відновлювальних робіт і зменшити негативний вплив на екологічну ситуацію цієї місцевості.

Відповідно до результатів проведених розрахунків вантажопідймальність запропонованого пристрою потрібно вибирати в діапазоні 45-50 т. Висота піднімання труби повинна бути обґрунтована перевірковими розрахунками і не повинна перевищувати 80 мм.

Проведені дослідження показали, що залежно від товщини встановленої підкладки між циліндричною поверхнею труби і роликів вантажозахопного пристрою нерівномірність питомого тиску між їх контактними поверхнями зменшується на 20-35 %.

Застосування для надземних переходів з компенсаторами розкопування ділянок входу трубопроводу у ґрунт чи його виходу із ґрунту на довжину 5 м можна зменшити необхідну вантажопідйомність підйомно-го пристрою на 22-25 %.

За результатами виконаних досліджень створено й апробовано Технологічну інструкцію з піднімання ділянки магістральних газопроводів на опорах надземних переходів балкового типу під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

## References

1. Alyamovskiy, A. A. (2012). *Inzhenemye raschety v SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press. [In Russian].
2. Doroshenko, Ya. V. (2020). Rozroblennia tekhnolohii remontu fasonnnykh elementiv truboprovodnykh system u vazhkodostupnykh mistsiakh. *Naftohazova enerhetyka*, 1(33), 36–46. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-1\(33\)-36-46](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-1(33)-36-46)

3. Doroshenko, Ya. V., Oliynyk, A. P., & Karpash, O. M. (2020). Modeling of Stress-Strain State of Piping Systems with Erosion and Corrosion Wear. *Physics and chemistry of solid state*, 21(1), 151–156. <https://doi.org/10.15330/pss.21.1.151-156>
4. DSTU-NBV.2.3-21:2008. (2008). Natanova. Vyznachennia zalyshkovoi mitsnosti mahistralnykh truboprovodiv z defektamy. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 88. [In Ukrainian].
5. Dzyubyk, A. R., Palash, V. M., Nazar, I. B., Dzyubyk, L. V., & Palash, R. V. (2016). Welding renovation of supporting units in gap-crossing pipeline structures. *Scientific Bulletin of UNFU*, 26(1), 230–238. <https://doi.org/10.15421/40260143>
6. Hrytsiuk, Yu. I., & Andrushchakevych, O. T. (2018). Means for determining software quality by metric analysis methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(6), 159–171. <https://doi.org/10.15421/40280631>
7. Kychma, A. O., Luchko, Y. Y., & Kravets, I. B. (2019). Problemy opornykh konstrukttsii nadzemnykh dilianok naftohazoprovodiv tryvaloi ekspluatatsii. Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktyka, 16, 44–55. <https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189675>
8. Kychma, A. O., Predko, R. Ya., Novitskyi, Yu. Ya. (2006). Patent № 149709 Ukraina. MPK (2006.01) F16L 55/18. Sposib remontu dilianok truboprovodiv, roztashovanykh na oporakh balkovykh perekhodiv. Opubl. 01.12.2021, biul. no. 48, 4. [In Ukrainian].
9. Kychma, A., & Luchko, J. (2018). Estimation of the pipelines working capacity basing on the results of semimode testing. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 2(90), 39–49. [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2018.02.039](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.02.039)
10. Laus, A. I., Kolomyeyev, V. M., Savula, S. F., et al. (2008). Patent № 84855 Ukraina. Sposib provedennia pidhotovchykh, remontno-vidnovliuvannykh i zaklyuchnykh robot pry remonti dilianok hazoprovodiv, roztashovanykh na oporakh balkovykh perekhodi v. Opubl. 10.11.2008, biul. 21, 4. [In Ukrainian].
11. NAN Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrayiny "Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstrukttsiy, sporud ta mashyn" Zbirnyk naukovykh statey za rezultaty, otrymany v 2013-2015 rr. Naukovyi kerivnyk – akademik B. Ye. Paton Instytut elektrozvayuvannya im. Ye. O. Patona NAN Ukrainy. Kyiv, 2015. 816. [In Ukrainian].
12. SOU 49.5-30019801-115:2014. (2014). Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi mahistralnykh hazoprovodiv. Kyiv: Ukrtrans-haz, 265. [In Ukrainian].
13. Zapukhliak, V. B., Melnychenko, Y. H., Hrudz, V. Ya, Poberezhnyi, L. Ya., & Doroshenko, Ya. V. (2020). Analiz napruzhenno-deformovanoho stanu truboprovodiv pid chas pidsadzhuvannya. *Naftohazova enerhetyka*, 2(34), 56–66. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2\(34\)-56-66](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2(34)-56-66)

**A. O. Kychma, R. Ya. Predko, Yu. Ya. Novitskyi**

*Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine*

## REPAIR TECHNIQUE OF SUPPORTING UNITS OF ABOVE-GROUND SEGMENTS OF GAS PIPELINES USING MOBILE LIFTING DEVICES

A review of the latest research on safe operation and rational existing technologies for the repair of support units of above-ground segments of long-term gas pipelines (GPs) which run through water barriers or wetlands has been carried out. In the course of research we revealed that the use of traditional technologies for repairing of such above-ground segments of GPs with the use of pipelayers or truck cranes significantly increase the cost and time of repairing and restoration work. The use of tracked pipelayers and heavy cranes during the repair of GPs overpasses going through riverbeds and wetlands significantly worsens the environment and increases the total material costs for the work performed. The technology of repair of support units of above-ground sections of GPs without stopping gas transportation by means of mobile lifting devices is offered. The use of the developed design of the mobile lifting device and the proposed method of repair of support units of above-ground segments of long-time operated GPs the help of portable lifting devices allows carrying out repair work without stopping gas transportation and reducing the negative harmful influence on the environment. Using the finite element method, a mathematical model for determining the stress-strain state of the elements of the support node of GPs and the components of the lifting device is created. Recommendations on the optimal size of mobile lifting device parts and technological parameters of repair and restoration works of support units of above-ground segments of GPs are formulated. The obtained mathematical model and graphical dependences show that the increase in the deviation of the position of the pipeline from the design position leads to redistribution of the total reactions at the support nodes. The results of the research allow us to improve the effectiveness of regulation of the mutual position of the elements of the support nodes of the above-ground segments of GPs which run through water barriers or wetlands.

**Keywords:** pipeline; hydraulic cylinders; load handler; movable and immovable supports; computer model; finite element method.