№ 2(46) 2026

НАФТОГАЗОВА ЕНЕРГЕТИКА

ISSN 1993-9868 print
ISSN 2415-3109 online

https://nge.nung.edu.ua

Прийнято 28.10.2026. Прорецензовано 29.10.2026. Опубліковано 30.11.2026.

УДК 622.692.4:539.4 **DOI: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-97-107**

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ НАДЗЕМНОГО ПЕРЕХОДУ МАГІСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДУ ПРИ ЙОГО КАПІТАЛЬНОМУ РЕМОНТІ

Запухляк В. Б.*
доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2502-3896
e-mail: vasyl.zapukliak@nung.edu.ua

Дзюбик А. Р.
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри авіаційної та виробничої інфенерії
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
https://orcid.org/0000-0003-2091-171X
e-mail: andrii.r.dziubyk@lpnu.ua

Возний В. М.
аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0009-0000-2365-6430
e-mail: viktor.voznyi-a18522@nung.edu.ua

Дзюбик Л. В.
кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
https://orcid.org/0000-0001-6942-9436
e-mail: liudmyla.v.dziubyk@lpnu.ua

Тацакович Н. Л.
кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна
https://orcid.org/0009-0006-0600-2519
e-mail: nazarii.tatsakovych@nung.edu.ua

Запропоноване посилання: Запухляк, В. Б., Дзюбик, А. Р., Возний, В. М., Дзюбик, Л. В. & Тацакович, Н. Л. (2026). Забезпечення міцності надземного переходу магістрального трубопроводу при його капітальному ремонті. Нафтогазова енергетика, 2(46), 97-107. doi: 10.31471/1993-9868-2026-2(46)-97-107.

* Відповідальний автор

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуто питання забезпечення міцності надземних переходів магістральних нафтопроводів під час виконання капітального ремонту, пов'язаного із заміною пошкоджених ділянок трубопроводу та відновленням його експлуатаційної надійності. Особливу увагу приділено дослідженню напружено-деформованого стану трубопроводу, впливу конструктивних особливостей надземного переходу, податливості проміжних опор та характеристик ґрунтової основи прилеглих підземних ділянок. Для проведення досліджень використано математичну модель трубопроводу у вигляді балки зі змінною згинною жорсткістю, яка дає змогу визначати розподіл згинних моментів, поперечних сил і напружень за різних умов навантаження та вертикального положення опор. Проаналізовано особливості формування зон підвищених згинних напружень та їх вплив на вибір місць розташування кільцевих зварних з'єднань під час виконання ремонтних робіт. Розглянуто можливість регулювання вертикального положення трубопроводу для зменшення згинних моментів у місцях вирізання пошкоджених ділянок і вварювання ремонтних котушок. Досліджено вплив жорсткості ґрунтової основи на величину необхідних регулювальних переміщень та умови виконання монтажно-зварювальних операцій. Встановлено, що для досліджуваного двохопорного переходу найбільші згинні напруження виникають над проміжними опорами (до 33,2 МПа), а зони їх підвищених значень поширюються на відстань до 1,5 м від опор. Показано, що для забезпечення нульового згинного моменту в місці вварювання котушки-труби трубопровід над опорою необхідно опустити на 11,5–12 мм за коефіцієнта жорсткості ґрунту 10 МПа/м, а за його зменшення до 5 МПа/м – до 14,5 мм. Запропонований підхід спрямований на обґрунтування раціональних технологічних параметрів капітального ремонту, зменшення додаткових монтажних навантажень і забезпечення надійної експлуатації відремонтованих надземних переходів магістральних трубопроводів.

Ключові слова: напружено-деформований стан; згинні напруження; зварні з'єднання; жорсткість ґрунтової основи; вертикальне регулювання опор.

Вступ

Багатоопорні надземні переходи магістральних трубопроводів мають широке використання в промисловості при подоланні природних та штучних перешкод (рис. 1). Особливо актуальним є використання таких конструкцій в гірських умовах [1, 2], на ділянках із нестійкими ґрунтами, сейсмічно нестабільними зонами чи промисловими виробітками [3, 4]. Тут підземне прокладання трубопроводів має додаткові потенційні ризики, щодо сталого моніторингу та встановлення технічного стану труб. При цьому надземне прокладання трубопроводу на окремостоячих опорах також вимагає періодичного обстеження з метою виявлення різноманітних відхилень відносно проєктного стану. Відкритий характер конструкції надземної ділянки щодо впливу навколишнього середовища, в поєднанні з тривалою експлуатацією, може призводити не лише до пошкодження матеріалу труб, а також до непрогнозованого зміщення опорних елементів [5]. В результаті виникає необхідність у реалізації капітального ремонту, яка полягає в ремонті опор, заміні ізоляції або заміні окремих частин труб, вирізанні пошкоджених та вварюванні нових частин труб, так званих котушок-труб, і т.д. [5].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Питання забезпечення міцності надземних ділянок магістральних трубопроводів є достатньо багатогранним та передбачає вивчення не лише дійсного стану конструктивних елементів переходу, а також оцінку факторів, які призводять до відхилення від проєктного положення та ризиків виникнення надзвичайних ситуацій [6, 7]. При цьому надземна ділянка розглядається як цілісна конструкція, яка зазнає експлуатаційних навантажень, а також непрогнозованих зовнішніх та внутрішніх впливів [1, 8]. Зокрема спорудження в зоні нестійких грунтів може призводити до переміщення підземної частини трубопроводу [2] або зміщення опорних елементів [1, 4, 9]. В результаті спостерігається перевантаження матеріалу труб та виникають незворотні дефекти, зокрема пластичні деформації матеріалу (рис. 2), що обумовлює реалізацію комплексу ремонтних робіт.

Транспортовані продукти також можуть призводити до негативного впливу на властивості матеріалу труб, погіршуючи їхні механічні характеристики, особливо показники тріщиностійкості [10 – 12]. Наявність зварних швів труб потребує особливої уваги щодо можливих зварювальних дефектів та зміни механічних характеристик в результаті дії термічного циклу зварювання [12, 13]. Тут спостерігаються значні залишкові напруження, які суттєво впливають на експлуатаційні властивості зварної конструкції за наявності додаткових статичних та циклічних навантажень [14, 15]. Недотримання вимог щодо якості ізолювання або пошкодження захисного покриття призводять до утворення корозійних виразок, в тому числі таких, що неможливо виправити без реалізації процесу капітального ремонту.



Рисунок 1 – Типовий двохопорний надземний перехід трубопроводу



Рисунок 2 – Гофра труби надземної ділянки

При вивченні міцності надземних ділянок важливим є врахування податливості ґрунтової основи, яка може створювати додаткові, відмінні від проектованих, вертикальні переміщення трубопроводу. Це може суттєво впливати на несівну властивість як трубопроводу так і опорних елементів. Останні можуть зазнавати значних перевантажень, що негативно впливає на їх технічний стан та може призводити до часткового чи повного руйнування. Особливо актуальним є встановлення технічного стану труби в перерізі опори, оскільки обмежений доступ до таких ділянок створює умови для інтенсивного кородування за недостатньо якісного ізолювання або пошкодження покриття [16]. Використання тривимірного моделювання в таких задачах переважно практикується при вивченні локальних пошкоджень та дефектів типу корозійних виразок, зварювальних дефектів тощо [17]. У випадку визначення навантажень та напружень в конструкції надземної ділянки магістрального трубопроводу більш практичними є підходи, що орієнтуються на дослідження стержневих систем. Зокрема в роботах [1, 18] розкриваються це питання для випадків безопорних та одноопорного надземного переходу із наявним монтажним зазором в перерізі опори. В роботі [8], вивчається напружено-деформований стан трьохопорного надземного переходу магістрального нафтопроводу із врахуванням податливості проміжних опор та ґрунту прилеглих підземних ділянок. Тобто, встановлення діючих зусиль та напружень в трубопроводі достатньо повно розкрито в спеціальній літературі.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених оцінюванню напружено-деформованого стану надземних переходів магістральних трубопроводів, питання забезпечення їхньої міцності безпосередньо під час виконання капітального ремонту залишаються недостатньо вивченими. Більша увага приділяється створенню умов для безпечного підіймання трубопроводу та уникненню при цьому локального деформування труб [19]. Зокрема, потребує додаткового обґрунтування раціональне розташування кільцевих зварних з'єднань відносно проміжних опор з урахуванням фактичного розподілу згинних моментів і напружень. Недостатньо досліджено також особливості перерозподілу внутрішніх силових факторів під час вирізання пошкоджених ділянок трубопроводу та вварювання ремонтних котушок, що може супроводжуватися зміною взаємного положення торців труб і виникненням додаткових монтажних напружень.

Окремою невирішеною проблемою є визначення необхідних вертикальних переміщень трубопроводу в опорних перерізах для забезпечення сприятливих умов виконання ремонтно-зварювальних робіт. При цьому недостатньо встановлено вплив жорсткості ґрунтової основи прилеглих підземних ділянок на величину регулювальних переміщень та характер розподілу згинних моментів. Вирішення зазначених питань дасть змогу обґрунтувати технологічні параметри капітального ремонту, зменшити додаткові монтажні навантаження та підвищити експлуатаційну надійність надземних переходів магістральних трубопроводів.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є обґрунтування умов забезпечення міцності надземних переходів магістральних трубопроводів під час виконання капітального ремонту шляхом дослідження розподілу згинних моментів і напружень та визначення раціональних величин вертикальних переміщень трубопроводу в опорних перерізах з урахуванням жорсткості ґрунтової основи прилеглих підземних ділянок.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити розподіл згинних моментів і напружень у двохопорному надземному переході магістрального трубопроводу та встановити ділянки їх максимальних значень для обґрунтування раціонального розташування кільцевих зварних з'єднань;
- визначити необхідні величини вертикальних переміщень трубопроводу в опорних перерізах для забезпечення нульових згинних моментів у місцях виконання ремонтно-зварювальних робіт;
- встановити вплив жорсткості ґрунтової основи прилеглих підземних ділянок на величину регулювальних переміщень трубопроводу під час капітального ремонту;
- розробити рекомендації щодо вибору технологічних параметрів капітального ремонту надземних переходів магістральних трубопроводів з метою зменшення додаткових монтажних напружень та забезпечення їхньої експлуатаційної надійності.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для проведення досліджень використано математичну модель надземного переходу у вигляді балки кусково-змінної жорсткості ($D(x)$), загальною довжиною l, в системі координат xOy, що розміщена на початку надземної ділянки, де вісь Ox направлена вздовж трубопроводу вправо, а вісь Oy – вниз (рис. 3). Прогини надземної ($w(x)$) та підземних (w_m) прилеглих ділянок задовільняються наступними диференціальними рівняннями [8, 20]:

$$\left(D(x)w''(x)\right)'' = q(x),\ x \in (0,l), \qquad (1)$$

$$(D_m^0 w_m'')'' = k_m(f_m - w_m) + q_m^0,\ m = 1,2, \qquad (2)$$

де $q(x)$ – система зовнішнього навантаження,

D^0_m – жорсткість відповідної підземної ділянки трубопроводу на згин,

k_m – приведений коефіцієнт жорсткості ґрунту,

f_m – форма осьової лінії трубопроводу після зсуву ґрунту.

Згинний момент, перерізувальна сила та осьові напруження в розглядуваній балковій моделі трубопроводу визначаються за формулами:

$$M(x) = -D(x)w''(x),\quad Q(x) = M'(x),$$

$$\sigma^b = My/(\pi t r_n^3). \qquad (3)$$

Програмна реалізація математичної моделі показана в роботі [8, 20] та дає змогу врахувати податливість елементів в перерізі проміжної опори, жорсткість ґрунту (k_m), різну товщину труб надземної та підземної ділянок, можливість регулювання висотного положення опор (z_{0i}). Використовуючи умови рівності переміщень, кутів повороту, моментів та перерізувальних сил у точках з'єднання надземної та підземних ділянок, а також умови контакту балки з опорами можна обчислити прогин осі трубопроводу, реакції опор, величину згинних моментів та величину згинних напружень.

В роботі розглядається задача про заміну ділянки трубопроводу над проміжною опорою в процесі виконання капітального ремонту. Обчислення виконувалися для двохопорного надземного переходу загальною протяжністю 48,02 м, із координатами 15,23 м та 33,57 м для першої (*1*) та другої (*2*) опори відповідно. Матеріал труб відповідає класу міцності Х52 для трубної сталі, зовнішній діаметр труб 720 мм, товщина стінки 9,5 мм, розглядається транспортована нафта середньої густини 860 кг/м^3, коефіцієнт податливості опор 0,1 м/МН. Підземні ділянки трубопроводу прокладені на ґрунті середньої густини 2750 кг/м^3; коефіцієнт жорсткості грунту 10 МПа/м; глибина залягання нафтопроводу відносно верхньої твірної труби складає 1,2 м. Схема розглядуваної надземної ділянки наведена на рис. 3.

Тут (рис. 3) показані регульовані вертикальні переміщення (z_{0i}, де i = 1, 2), які дають змогу врахувати необхідні зміщення осі трубопроводу над проміжною опорою при виконанні ремонтних операцій.

Результати досліджень та обговорення

Відповідно до прийнятої схеми надземної ділянки та встановленої системи навантаження було проведено обчислення положення осі трубопроводу, реакцій опор, згинних моментів, перерізуючих сил за прямолінійного розташування проміжних опор відносно трубопроводу. Розподіл напружень, які зумовлені дією згина-

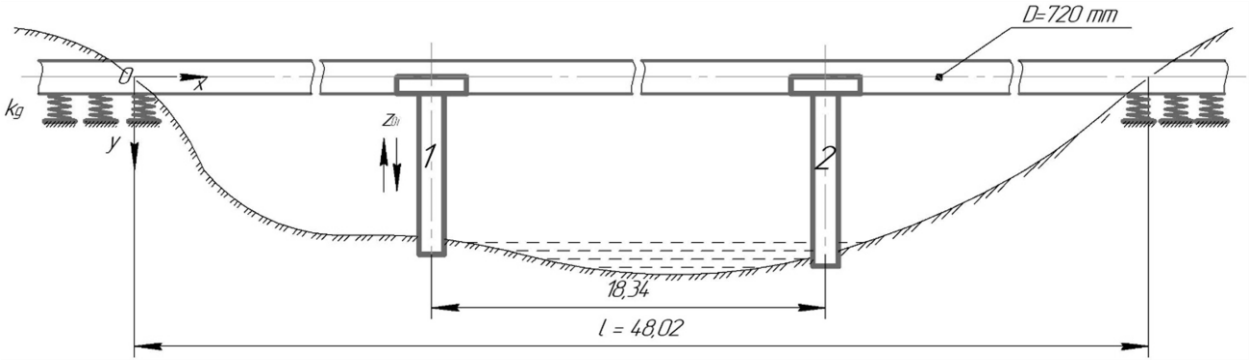


Рисунок 3 – Схема досліджуваної двохопорної надземної ділянки

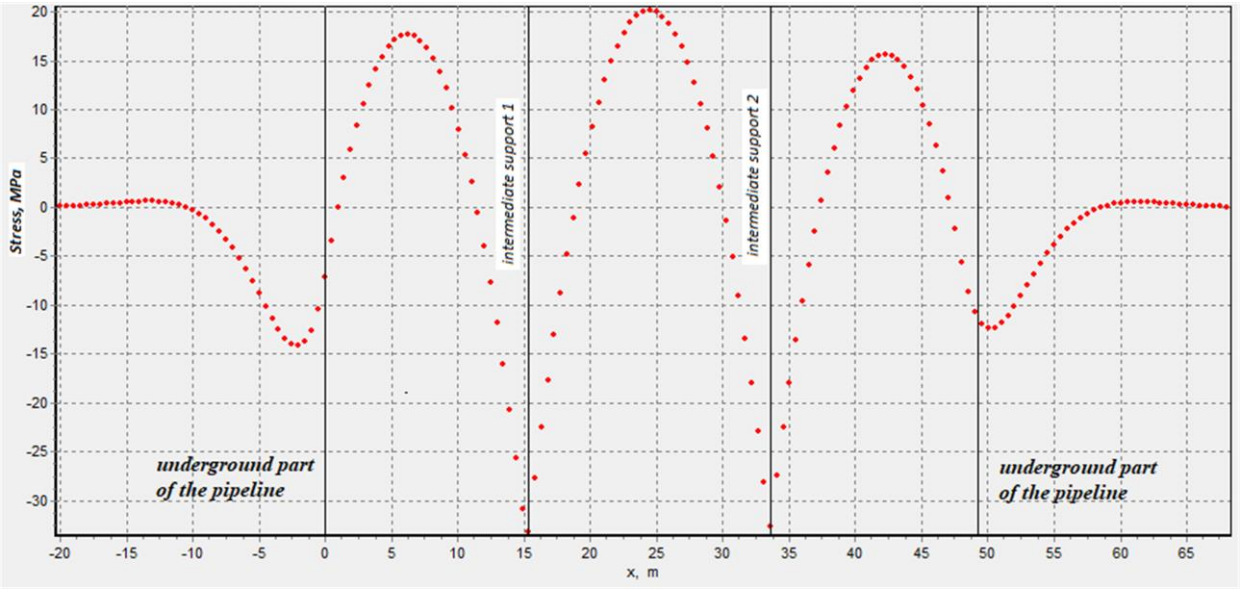


Рисунок 4 – Розподіл згинних напружень в надземній ділянці (інтерфейс програмного забезпечення)

льних моментів на нижній твірній труби, показані на рис. 4. Тут початок надземної ділянки співпадає із початковим значенням системи координат, відповідно вліво відносно початку координат та вправо після 48,02 м показаний розподіл згинних напружень в підземних частинах трубопроводу на ділянці до 20 м.

Отже, розподіл згинних напружень в розглядуваному двохопорному переході мають коливний характер із локальними максимумами не лише в надземній частині, а також на підземних ділянках, де максимальні значення спостерігаються в підземній частині трубопроводу на виході (14,19 МПа) та вході (12,31 МПа) трубопроводу в ґрунт орієнтовно на 2,0 м. Над проміжними опорами та по середині центрального прогону надземної ділянки згинні напруження досягають свого максимального значення та, в розглядуваному випадку, становлять −33,21 МПа та −32,66 МПа над першою і другою опорою відповідно, та 20,15 МПа по середині центрального прогону. При цьому реакції опор складають −0,0910 МН та −0,0887 МН для першої та другої проміжної опори відповідно. Розподіл згинних моментів має аналогічний характер та досягає максимальних значень над першою (−0,1284 МН·м) та другою (−0,1263 МН·м) проміжними опорами, а також по середині центрального прогону (0,0779 МН·м).

Відповідно до отриманих результатів максимальні напруження спостерігаються в околі проміжних опор та по середині центрального прогону. При цьому над проміжними опорами ці напруження спостерігаються на проміжку до 1,5 м. Зважаючи на те, що згинні напруження можуть складати до третини від загального напруженого стану надземної ділянки нафтопроводу [8], область локального зростання напружень є достатньо великою. Тобто, рекомендована в спеціальній літературі відстань 200 мм від краю опори до поперечного зварного шва труб, може знаходитися в цій області концентрації напружень. Тому для уникнення не-

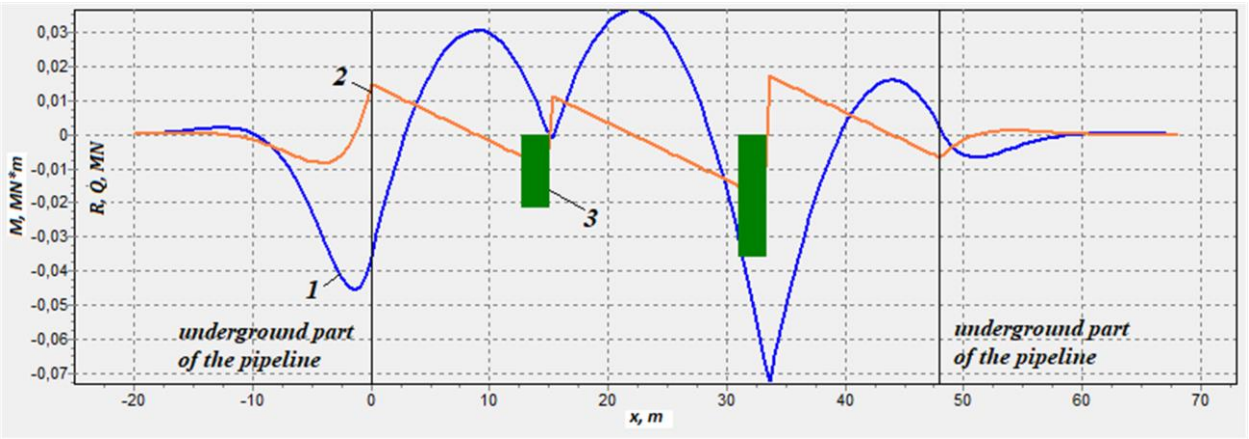


Рисунок 5 – Розподіл згинних моментів (1), поперечної сили (2) та реакції опор (3) при опусканні трубопроводу над першою опорою на 12 мм (інтерфейс програмного забезпечення)

гативних наслідків від перевантаження матеріалу труб, рекомендується при спорудженні нових надземних ділянок або ремонті існуючих, встановлювати більшу відстань від краю опори до поперечного зварного шва, в кожному випадку індивідуально, за результатами попередніх розрахунків. Аналогічні рекомендації щодо зміщення поперечних зварних стиків труб стосуються центрального прогону надземної ділянки та місць виходу і входу трубопроводу в грунт.

Згідно існуючого технологічного процесу капітального ремонту надземної ділянки [5], заміна пошкодженої частини труби в околі проміжної опори шляхом вварювання нової, так званої котушки-труби, виконується при наявності пошкоджень більше 20 % товщини стінки труби [5, 16] або за незворотніх дефектів матеріалу труб типу гофр (рис. 2). Це передбачає повну зупинку ділянки трубопроводу, його випорожнення від транспортованого продукту для виконання підготовчих та монтажно-зварювальних операцій щодо вварювання нової котушки-труби. Підіймання трубопроводу здійснюється рівномірно та одночасно з обох боків, щоб забезпечити необхідний доступ до ремонтованої ділянки. При цьому торцеві поверхні розрізаної труби будуть повертатися внаслідок дії згинальних моментів. В результаті вварювання нової котушки-труби є ускладненим, потребує додаткових підгінних операцій, а наступне встановлення надземної ділянки на проміжну опору призведе до виникнення додаткових монтажних напружень на трубопровід. Для уникнення цього ефекту в роботі розглянуто задачу про забезпечення нульового моменту в місці розрізання трубопроводу. Це забезпечить паралельність торцевих поверхонь, зменшить об’єм підгінних операцій на стадії складання зварного стика труб та дасть змогу відновити трубопровід без перевантаження в місці вварювання котушки-труби.

Проведені обчислення показали, що для розглядуваного двохопорного надземного переходу нафтопроводу, без внутрішнього наповнення транспортованими нафтопродуктами, величина вертикального регулювання вниз має складати 12 мм для першої опори та 11,5 мм для другої опори за прийнятого коефіцієнт жорсткості ґрунту в 10 МПа/м. Результати обчислення умов забезпечення нульового згинального моменту над першою проміжною опорою показано на рис. 5 в інтерфейсі розробленого програмного забезпечення.

Слід відмітити, що на величину регулювальних вертикальних переміщень опор має суттєвий вплив прийнятий коефіцієнт жорсткості ґрунту, який для випадку середньої щільності (залежаний пісок, насипний гравій, волога глина) може знаходитися в межах від 5 МПа/м до 50 МПа/м. На це, в свою чергу, мають вплив умови спорудження трубопроводу, існуюча ґрунтова основа, тривалість експлуатації надземної ділянки тощо. Результати необхідних регулювальних вертикальних переміщень для першої та другої опор за різного коефіцієнт жорсткості ґрунту, для розглядуваної надземної ділянки, показано на рис. 6.

Отже, при зростанні коефіцієнту жорсткості ґрунту більше 30 МПа/м величина регулювальних переміщень для досягнення нульового моменту над опорою практично не змінюється та складає близько 10 мм. Однак, за значення коефіцієнту жорсткості ґрунту 5 МПа/м, величина вертикального регулювального переміщення зростає більше як на 40 % та дорівнює 14,5 мм для першої та 14 мм другої опори відповідно. Тому характеристики ґрунту, в межах

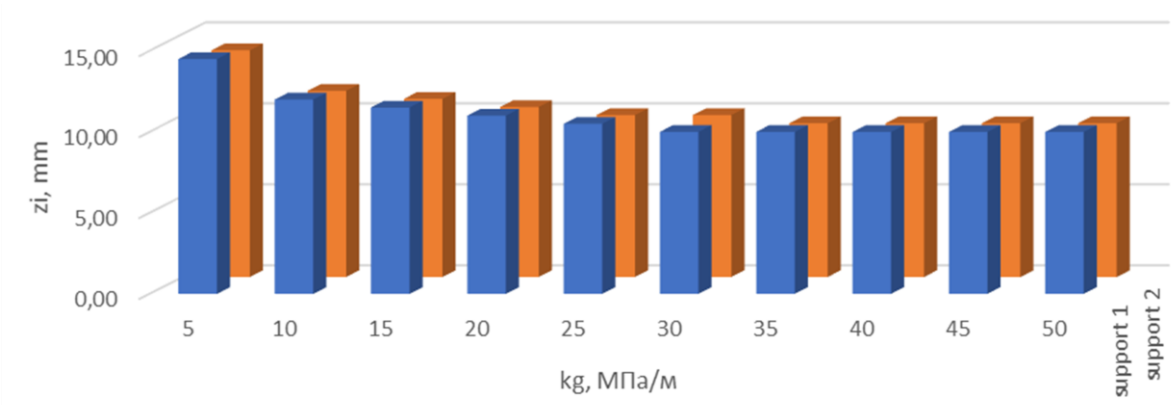


Рисунок 6 – Величина регулювальних переміщень проміжних опор надземної ділянки при капітальному ремонті

існуючого діапазону значень жорсткості грунту, можуть суттєво впливати на величину регулювальних переміщень надземної ділянки при виконанні капітального ремонту трубопроводу. Відповідно, при капітальному ремонті необхідно попередньо здійснювати встановлення коефіцієнту жорсткості грунту ремонтованої надземної ділянки та прилеглих підземних частинах трубопроводу.

Висновки

На основі проведених досліджень напружено-деформованого стану двохопорного надземного переходу магістрального нафтопроводу встановлено, що найбільші за абсолютною величиною згинні напруження виникають у перерізах проміжних опор та досягають 33,21 МПа і 32,66 МПа відповідно, тоді як у середині центрального прогону їх величина становить 20,15 МПа. Виявлено, що зони підвищених згинних напружень поблизу проміжних опор поширюються на відстань до 1,5 м, що необхідно враховувати під час визначення місць розташування кільцевих зварних з'єднань. Обґрунтовано доцільність індивідуального визначення відстаней від опор до зварних стиків за результатами попередніх розрахунків напружено-деформованого стану трубопроводу.

Встановлено, що регулювання вертикального положення трубопроводу в опорних перерізах дає змогу забезпечити нульові значення згинних моментів у місцях виконання ремонтно-зварювальних робіт. Для досліджуваного надземного переходу за коефіцієнта жорсткості ґрунту 10 МПа/м необхідне опускання трубопроводу становить 12 мм над першою опорою та 11,5 мм над другою. Застосування такого підходу створює сприятливі умови для суміщення торців труб під час вварювання ремонтних котушок, зменшення обсягу підгінних операцій та обмеження додаткових монтажних напружень.

Визначено вплив жорсткості ґрунтової основи прилеглих підземних ділянок на величину необхідних регулювальних переміщень трубопроводу. Встановлено, що зі зменшенням коефіцієнта жорсткості ґрунту до 5 МПа/м необхідне вертикальне переміщення зростає до 14,5 мм для першої та 14 мм для другої опори. За значень коефіцієнта жорсткості понад 30 МПа/м величина переміщень практично стабілізується на рівні близько 10 мм. Отримані результати підтверджують необхідність урахування фактичних характеристик ґрунтової основи під час розроблення технології капітального ремонту надземних переходів.

За результатами досліджень обґрунтовано доцільність попереднього розрахункового визначення місць розташування ремонтних зварних з'єднань та величин вертикального регулювання трубопроводу з урахуванням геометричних характеристик надземного переходу, податливості опор і жорсткості ґрунтової основи. Запропонований підхід може бути використаний під час планування та виконання капітального ремонту для зменшення несприятливого впливу згинних навантажень і підвищення експлуатаційної надійності відремонтованих ділянок магістральних трубопроводів.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Dutkiewicz M., Velychkovych A., Andrusyak A., Petryk I., Kychma A. Analytical Model of Interaction of an Oil Pipeline with a Support of an Overpass Built in a Mountainous Area. Energies. 2023. Vol. 16, No. 11. Art. 4464. DOI: https://doi.org/10.3390/en16114464.

2. Kryzhanivs'kyi E. I., Rudko V. P., Shats'kyi I. P. Estimation of admissible loads upon a pipeline in the zone of sliding ground. Materials Science. 2004. Vol. 40. P. 547–551. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-005-0076-z.

3. Li X., Wu Q., Jin H., Kan W. A New Stress Monitoring Method for Mechanical State of Buried Steel Pipelines under Geological Hazards. Advances in Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 2022. Art. 4498458. 14 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/4498458.

4. Xu P., Zhang M., Lin Z., Cao Z., Chang X. Additional Stress on a Buried Pipeline under the Influence of Coal Mining Subsidence. Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. Art. 3245624. DOI: https://doi.org/10.1155/2018/3245624.

5. Дорошенко Я. В. Спорудження та ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с.

6. Mohamed Azzam M. Failure Analysis of Pipelines in the Oil and Gas Industry. Pipeline Engineering – Design, Failure, and Management. IntechOpen, 2023. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.108140.

7. Dai L., Wang D., Wang T., Feng Q., Yang X. Analysis and Comparison of Long-Distance Pipeline Failures. Journal of Petroleum Engineering. 2017. Vol. 2017. Art. 3174636. 7 p. DOI: https://doi.org/10.1155/2017/3174636.

8. Dzyubyk A. R., Dzyubyk L. V., Pokhmurs'ka H. V., Prokopyshyn I. A. Residual Strength of the Overhead Section of a Main Pipeline with Annular Cracks. Materials Science. 2019. Vol. 54. P. 855–865. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-019-00273-4.

9. Zvirko O. I., Tsyrulnyk O. T., Krechkovska H. V. et al. The influence of the structural-mechanical state of the gas transit pipeline steel on the susceptibility to hydrogen embrittlement. Materials Science. 2024. Vol. 60. P. 20–26. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-024-00845-z.

10. Hredil M., Tsyrulnyk O., Shtoyko I., Zvirko O. Influence of gaseous hydrogen on corrosion of pipeline steel. Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 59. P. 151–157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.023.

11. Okipnyi I., Poberezhny L., Zapukhliak V., Hrytsanchuk A., Poberezhna L., Stanetsky A., Kravchenko V., Rybitskyi I. Impact of Long-Term Operation on the Reliability and Durability of Transit Gas Pipelines. Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering. 2020. Vol. 70, No. 1. P. 115–126. DOI: https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0011.

12. Dzyubyk A. R. Impact Toughness of Welded Joints on 34KhN2MA Steel Produced from Electrodes with Various Phase Compositions. Materials Science. 2020. Vol. 56. P. 203–209. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-020-00416-y.

13. Dzyubyk A. R., Voitovych A. A., Dzyubyk L. V. et al. Specific Features of the Fatigue Fracture of Welded Joints of 34KhN2MA Steel Formed by Electrodes with Different Phase Compositions. Materials Science. 2018. Vol. 54. P. 215–222. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-018-0176-1.

14. Kychma A., Luchko J. Estimation of the pipelines working capacity basing on the results of semimode testing. Scientific Journal of TNTU. 2018. Vol. 90, No. 2. P. 39–49. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.02.039.

15. Osadchuk V. A., Tsymbalyuk L. I., Dzyubyk A. R. Determination of the triaxial distribution of residual stresses in welded joints of structural elements with rectilinear seams and estimation of their influence on joint strength in the presence of crack-type defects. Journal of Mathematical Sciences. 2012. Vol. 183. P. 150–161. DOI: https://doi.org/10.1007/s10958-012-0803-6.

16. Кичма А. О., Лучко Й. Й., Кравець І. Б. Проблеми опорних конструкцій надземних ділянок нафтогазопроводів тривалої експлуатації. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2019. № 16. С. 44–55. DOI: https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189675.

17. Doroshenko Y., Kogut G., Rybitskyi I., Tarayevs'kyy O., Pyrig T. Numerical investigation on erosion wear and strength of main gas pipelines bends. Physics and Chemistry of Solid State. 2021. Vol. 22, No. 3. P. 551–560. DOI: https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.551-560.

18. Velychkovych A. S., Andrusyak A. V., Pryhorovska T. O., Ropyak L. Y. Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles. 2019. Vol. 74. Art. 65. DOI: https://doi.org/10.2516/ogst/2019039.

19. Dutkiewicz M., Andrusyak A., Kychma A., Vytvytskyi V., Velychkovych A. Numerical model of interaction of a mobile lift chain with a main gas pipeline pipe in the process of repair work. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. 2024. Vol. 26, No. 3. DOI: https://doi.org/10.17531/ein/187159.

20. Dzyubyk A. R., Grudz V. Y., Zapukhliak V. B., Kindrats'kyi B. I., Nazar I. B., Dzyubyk L. V. Repair of Supports of the Aboveground Part of the Main Pipeline. New Technologies, Development and Application VIII : NT 2025 / ed. by I. Karabegović, A. Kovačević, S. Mandžuka. Cham : Springer, 2025. (Lecture Notes in Networks and Systems ; vol. 1482). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-95194-7_72.

References

1. Dutkiewicz, M., Velychkovych, A., Andrusyak, A., Petryk, I., & Kychma, A. (2023). Analytical model of interaction of an oil pipeline with a support of an overpass built in a mountainous area. Energies, 16(11), 4464. https://doi.org/10.3390/en16114464

2. Kryzhanivs'kyi, E. I., Rudko, V. P., & Shats'kyi, I. P. (2004). Estimation of admissible loads upon a pipeline in the zone of sliding ground. Materials Science, 40, 547–551. https://doi.org/10.1007/s11003-005-0076-z

3. Li, X., Wu, Q., Jin, H., & Kan, W. (2022). A new stress monitoring method for mechanical state of buried steel pipelines under geological hazards. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 4498458. https://doi.org/10.1155/2022/4498458

4. Xu, P., Zhang, M., Lin, Z., Cao, Z., & Chang, X. (2018). Additional stress on a buried pipeline under the influence of coal mining subsidence. Advances in Civil Engineering, 2018, 3245624. https://doi.org/10.1155/2018/3245624

5. Doroshenko, Ya. V. (2015). Sporudzhennia ta remont zoseredzhenykh obiektiv hazonaftoprovodiv [Construction and repair of concentrated facilities of gas and oil pipelines]. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG. [in Ukrainian]

6. Mohamed Azzam, M. (2023). Failure analysis of pipelines in the oil and gas industry. In Pipeline engineering – Design, failure, and management. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.108140

7. Dai, L., Wang, D., Wang, T., Feng, Q., & Yang, X. (2017). Analysis and comparison of long-distance pipeline failures. Journal of Petroleum Engineering, 2017, 3174636. https://doi.org/10.1155/2017/3174636

8. Dzyubyk, A. R., Dzyubyk, L. V., Pokhmurs'ka, H. V., & Prokopyshyn, I. A. (2019). Residual strength of the overhead section of a main pipeline with annular cracks. Materials Science, 54, 855–865. https://doi.org/10.1007/s11003-019-00273-4

9. Zvirko, O. I., Tsyrulnyk, O. T., Krechkovska, H. V., et al. (2024). The influence of the structural-mechanical state of the gas transit pipeline steel on the susceptibility to hydrogen embrittlement. Materials Science, 60, 20–26. https://doi.org/10.1007/s11003-024-00845-z

10. Hredil, M., Tsyrulnyk, O., Shtoyko, I., & Zvirko, O. (2024). Influence of gaseous hydrogen on corrosion of pipeline steel. Procedia Structural Integrity, 59, 151–157. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.023

11. Okipnyi, I., Poberezhny, L., Zapukhliak, V., Hrytsanchuk, A., Poberezhna, L., Stanetsky, A., K?-ravchenko, V., & Rybitskyi, I. (2020). Impact of long-term operation on the reliability and durability of transit gas pipelines. Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, 70(1), 115–126. https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0011

12. Dzyubyk, A. R. (2020). Impact toughness of welded joints on 34KhN2MA steel produced from electrodes with various phase compositions. Materials Science, 56, 203–209. https://doi.org/10.1007/s11003-020-00416-y

13. Dzyubyk, A. R., Voitovych, A. A., Dzyubyk, L. V., et al. (2018). Specific features of the fatigue fracture of welded joints of 34KhN2MA steel formed by electrodes with different phase compositions. Materials Science, 54, 215–222. https://doi.org/10.1007/s11003-018-0176-1

14. Kychma, A., & Luchko, J. (2018). Estimation of the pipelines working capacity basing on the results of semimode testing. Scientific Journal of TNTU, 90(2), 39–49. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2018.02.039

15. Osadchuk, V. A., Tsymbalyuk, L. I., & Dzyubyk, A. R. (2012). Determination of the triaxial distribution of residual stresses in welded joints of structural elements with rectilinear seams and estimation of their influence on joint strength in the presence of crack-type defects. Journal of Mathematical Sciences, 183, 150–161. https://doi.org/10.1007/s10958-012-0803-6

16. Kychma, A. O., Luchko, Y. Y., & Kravets, I. B. (2019). Problemy opornykh konstruktsii nadzemnykh dilianok naftohazoprovodiv tryvaloi ekspluatatsii [Problems of support structures of aboveground sections of oil and gas pipelines in long-term operation]. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka [Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice], 16, 44–55. https://doi.org/10.15802/bttrp2019/189675 [in Ukrainian]

17. Doroshenko, Y., Kogut, G., Rybitskyi, I., Tarayevs'kyy, O., & Pyrig, T. (2021). Numerical investigation on erosion wear and strength of main gas pipelines bends. Physics and Chemistry of Solid State, 22(3), 551–560. https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.551-560

18. Velychkovych, A. S., Andrusyak, A. V., Pryhorovska, T. O., & Ropyak, L. Y. (2019). Analytical model of oil pipeline overground transitions, laid in mountain areas. Oil & Gas Science and Technology – Revue d'IFP Energies nouvelles, 74, 65. https://doi.org/10.2516/ogst/2019039

19. Dutkiewicz, M., Andrusyak, A., Kychma, A., Vytvytskyi, V., & Velychkovych, A. (2024). Numerical model of interaction of a mobile lift chain with a main gas pipeline pipe in the process of repair work. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 26(3). https://doi.org/10.17531/ein/187159

20. Dzyubyk, A. R., Grudz, V. Y., Zapukhliak, V. B., Kindrats'kyi, B. I., Nazar, I. B., & Dzyubyk, L. V. (2025). Repair of supports of the aboveground part of the main pipeline. In I. Karabegović, A. Kovačević, & S. Mandžuka (Eds.), New technologies, development and application VIII. NT 2025 (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1482). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95194-7_72

ENSURING STRUCTURAL STRENGTH OF AN ABOVE-GROUND MAIN PIPELINE CROSSING DURING MAJOR REPAIR

Zapukhliak V. B.
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-2502-3896
e-mail: vasyl.zapukliak@nung.edu.ua

Dziubyk A. R.
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Aviation and Manufacturing Engineering
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera St., Lviv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2091-171X
e-mail: andrii.r.dziubyk@lpnu.ua

Voznyi V. M.
Postgraduate student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0009-0000-2365-6430
e-mail: viktor.voznyi-a18522@nung.edu.ua

Dziubyk L. V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera St., Lviv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-6942-9436
e-mail: liudmyla.v.dziubyk@lpnu.ua

Tatsakovych N. L.
Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
https://orcid.org/0009-0006-0600-2519
e-mail: nazarii.tatsakovych@nung.edu.ua

Abstract. The article addresses the issue of ensuring the structural strength of aboveground crossings of main oil pipelines during major repairs involving the replacement of damaged pipeline sections and the restoration of their operational reliability. Particular attention is paid to investigating the stress-strain state of the pipeline, the influence of the structural characteristics of the aboveground crossing, the flexibility of intermediate supports, and the properties of the soil foundation surrounding adjacent underground pipeline sections. The study employs a mathematical model representing the pipeline as a beam with variable flexural rigidity, which enables the determination of bending moment, shear force, and stress distributions under different loading conditions and vertical positions of the supports. The formation of zones of increased bending stresses and their influence on selecting the locations of circumferential welded joints during repair operations are analyzed. The possibility of adjusting the vertical position of the pipeline to reduce bending moments at the locations where damaged sections are cut out and replacement pipe sections are welded in is examined. The influence of soil foundation stiffness on the required vertical adjustment displacements and the conditions for performing assembly and welding operations is investigated. It was established that for the studied two-support crossing the maximum bending stresses occur above the intermediate supports (up to 33.2 MPa), and the zones of elevated stresses extend up to 1.5 m from the supports. It was shown that ensuring zero bending moment at the location where the replacement pipe section is welded in requires lowering the pipeline above the support by 11.5–12 mm at a soil stiffness coefficient of 10 MPa/m and by up to 14.5 mm when it decreases to 5 MPa/m. The proposed approach aims to provide a scientific basis for selecting appropriate technological parameters for major pipeline repairs, reducing additional installation-induced stresses, and ensuring the reliable operation of repaired aboveground crossings of main pipelines.

Keywords: stress-strain state; bending stresses; welded joints; soil foundation stiffness; vertical support adjustment.