

622.692.4(043)
H 63

**Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу**

НИКОЛАЄВ Віталій Вікторович



622.692.4(043)
УДК 621.438:622 —

H63

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РЕМОНТУ ТРУБОПРОВІДІВ НА
ОСНОВІ ОЦІНКИ ЇХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт,
нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ- 2015



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент

Грудз Ярослав Володимирович, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м. Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Капцов Іван Іванович**, завідувач кафедри газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства, м. Харків

кандидат технічних наук **Драгілев Андрій Володимирович**, директор ПП «Інженірингові технології», м. Київ

Захист відбудеться 31 березня 2015 р. о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 28 лютого 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д20.052.04,
кандидат технічних наук, доцент

Пилипів Л.Д.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

актуальність проблеми. Роль трубопровідного транспорту в нафтогазовій галузі України є надзвичайно високою і її важко переоцінити. Як відомо, на сьогоднішній день в Україні функціонує понад 40 тис. кілометрів магістральних трубопроводів і трубопроводів - відгалужень, призначених для транспортування нафти і газу й інших продуктів. Багато з них знаходяться в експлуатації чверть століття і більше років. Тому під впливом внутрішнього навантаження від тиску транспортованого по них продукту, дії навколишнього середовища та циклічного режиму експлуатації, умов і швидкості деградації структури металу труби поступово знижується несуча здатність трубопроводів як в цілому, так і на окремих ділянках, що неминуче призводить до утворення концентраторів напружень, а, відповідно, і до зношення самого трубопроводу або його окремих ділянок, що вимагає застосування різноманітних видів і методів ремонту дефектних ділянок, заміни цих ділянок трубопроводів на нові. В окремих випадках операторам трубопровідного транспорту доводиться понижувати робочий (проектний) тиск транспортованого продукту, який може значно відрізнятись від проектного, що, в свою чергу, призводить до зниження обсягів транспортування нафти чи газу. При однакових витратах на їх транспортування відповідно понижуються економічні характеристики трубопровідного транспорту в цілому. Виходячи з вище наведеного, варто відзначити, що на сьогодні тематика ремонту виявлених у ході різноманітних обстежень лінійної частини дефектів металу труби є надзвичайно актуальним питанням.

Система газопостачання в Україні є надзвичайно складною енергетичною та металоємнісною конструкцією, яка характеризується великою потужністю, значною довжиною, складною структурою, різним віком і технічним станом магістральних газопроводів. Старіння газопроводів, велике число відмов і ушкоджень на лінійній частині серйозно ускладнюють процес технологічної експлуатації об'єктів газотранспортної системи, збільшують непродуктивні матеріальні витрати.

У цих умовах набуває актуальності завдання щодо забезпечення надійності функціонування газотранспортних систем із метою безперебійного постачання газу, зниження втрат газу, запобігання аваріям, відмовам, забрудненню навколишнього середовища.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить прикладний характер і входить у комплекс розробок НАК "Нафтогаз України", спрямованих на досягнення екологічної безпеки при експлуатації газовидобувного і газотранспортного комплексів України які знайшли своє відображення в Національній програмі «Концепція розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2009 – 2015 рр.»

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення взаємодії всіх чинників силового навантаження тіла труби магістрального трубопроводу в процесі виконання ремонтно- відновлювальних робіт по відновленню несучої здатності ділянки трубопроводу, на якій було виявлено

дефекти металу, що можуть у процесі свого розвитку призвести до повного його руйнування та виникнення аварійної ситуації з непередбачуваними наслідками.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

- вивчити та дослідити ряд експлуатаційних, силових та зовнішніх чинників, які впливають на виникнення та розвиток дефектів металу тіла труби в процесі довготривалої експлуатації магістральних трубопроводів;
- вивчити та проаналізувати методи ремонту тіла труби магістральних трубопроводів, які використовуються для відновлення їх несучої здатності з використанням новітніх технологій та методів;
- дослідити та проаналізувати напружено деформований стан ділянки трубопроводу тривалої експлуатації, яка відремонтована методом встановлення зварної муфти;
- розробити та впровадити нові методи ліквідації виявлених дефектів на магістральних трубопроводах тривалої експлуатації.

Об'єктом дослідження є процес ремонтно-відновлювальних робіт на ділянці магістрального трубопроводу при ліквідації виявлених дефектів металу труби.

Предметом дослідження є напружено-деформований стан ділянки магістрального трубопроводу тривалої експлуатації в процесі виконання ремонтних робіт.

Методи дослідження, які використовувались у ході виконання цієї роботи були:

- числові методи розв'язування диференціальних рівнянь;
- основні положення теорії оболонок, теорії ймовірності, механіки руйнування твердих тіл, опору матеріалів, матеріалознавства, інтегральна теорія лінійної спадкової повзучості;
- методи і закони теоретичної механіки, фізики, гідравліки і гідродинаміки;
- основи і методи теорій розрахунку та конструювання нафтогазопромислових машин і механізмів.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались методи планування експерименту і числової статистики. Обробка результатів експериментальних досліджень проводилась на основі математичного аналізу з використанням сучасних методів оброблення інформації як для статистичного аналізу, так і для апроксимації експериментальних даних.

Положення, що захищаються. Закономірності впливу чинників силового навантаження ділянки трубопроводу на напружено-деформований стан для вибору раціональних параметрів виконання ремонтно-відновлювальних робіт.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше:

Досліджені зміни напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу застосовані як традиційна стержнева теорія, так і напівбезмоментна теорія тонких оболонок при взаємодії конструкцій з ґрунтом при змінному коефіцієнті постелі в часі на краях ремонтного котловану.

Запропоновано і науково обґрунтовано застосування методу земляних перемичок у процесі капітального ремонту лінійних ділянок газопроводу в траншеї.

Визначено основні чинники, які зумовлюють характер та швидкість перебігу процесів внутрішньої корозії трубопроводів, а саме: наявність відчутних механічних напружень, хімічний склад та рух корозійного середовища.

Запропоновано способи ремонту газопроводів із використанням компенсаційних муфт та проведено дослідження їх ефективності.

Практичне значення одержаних результатів. Розв'язані в дисертації задачі, отримані результати дають можливість підвищити ефективність і надійність системи транспортування газу.

Розроблена методика розрахунку ділянки трубопроводу дозволяє оцінити його міцність у період проведення ремонтних робіт при різних характеристиках основи ґрунту, довжині ремонтного котловану і діючих осьових зусиль.

Встановлено вплив використання ремонтної муфти і зміни проектного положення ділянки трубопроводу на величину еквівалентних напружень у ремонтovanій зоні, прилеглий до країв муфти.

Особистий внесок здобувача. Автором дисертації виконані наступні наукові дослідження і розробки:

1. Дослідження впливу експлуатаційних, силових та зовнішніх чинників на виникнення та розвитку дефектів металу тіла труби [8,9].
2. Удосконалення методів ремонту трубопроводів, які використовуються для відновлення несучої здатності з використанням новітніх технологій [6,7].
3. Дослідження корозійно-механічних характеристик трубопровідних сталей газопроводів тривалої експлуатації [1].
4. Дослідження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу , відремontованої методом встановлення зварної муфти [2,3,4,5].
5. Автор брав безпосередню участь в розробці техніки і технології реалізації запропонованих методів ремонту газопроводів УМГ «Черкаситрансгаз» [9].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідались на: науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу факультету нафтогазопроводів (м. Івано-Франківськ, 2008,2010,2012); Нараді ДК Укртрансгаз НАК «Нафтогаз України» «Проблеми довгострокових реконструкцій ПСГ та шляхи їх вирішення» (м. Яремче, 2007); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовка кадрів галузі» (м. Івано-Франківськ, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», (м. Івано-Франківськ, 2012).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 9 друкованих праць, у тому числі 2 патенти, 4 - у фахових виданнях України, з яких 1 – у виданні, що входить до наукометричних баз.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, результатів, підсумкових висновків, переліку використаних джерел, що містить

128 найменування, та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 118 сторінках машинописного тексту.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано взаємозв'язок завдань щодо економного використання енергоносіїв на Україні з питаннями підвищення ефективності експлуатації газотранспортної системи України, доведена актуальність розробки нових методів і технологій ремонту газопроводів та оцінки напружено-деформованого їх стану при цьому, показано наукову новизну та практичну цінність розробки, особистий вклад автора а апробації роботи.

В першому розділі приводиться коротка характеристика газотранспортної системи України. Розвинена інфраструктура трубопровідного транспорту України і газової промисловості, зокрема, дають можливість ефективно інтегруватися в єдину Європейську систему постачання енергоносіїв. За таких умов зростають вимоги до надійності газопровідних систем. Але проблема її забезпечення та безаварійної роботи об'єктів щороку набуває все більш важливого значення, оскільки відбувається процес старіння основних фондів. На сьогодні гостро стоїть задача забезпечення стійкого розвитку в умовах значного зносу основних виробничих фондів та обмежених інвестиційних можливостей щодо реконструкції та технічного переозброєння.

Важливим напрямком роботи в газотранспортній системі є своєчасне проведення діагностики лінійної частини, за результатами якої проводиться складання планів першочергових ремонтів місць, небезпечних для експлуатації трубопроводів дефектів.

Зростаючі об'єми ремонту дефектних ділянок вимагають розробки і застосування більш економічних і менш трудомістких способів відновлення несучої здатності трубопроводу, що виключають вирізку труб, а в певних ситуаціях і зупинку процесу транспортування продукту. Залежно від виявлених дефектів металу труб і зварних з'єднань трубопроводів можуть застосовуватися різні методи ремонту. Ремонт зварними сталевими муфтами рекомендується виконувати у випадках неможливості або недоцільності ремонту заміною і прокладанням лупінгів, зварюванням (наплавленням, заварюванням), застосуванням клесзварних муфт, у тому числі у випадках неможливості тимчасового виведення газопроводу з експлуатації.

При ремонті трубопроводів допускається застосування декількох методів ремонту, а також виконання ремонту трубопроводу з наскрізними і ненаскрізними дефектами труб і зварних з'єднань методом зварювання (наплавлення), вварювання латок з подальшою установкою зварних сталевих муфт.

На основі викладеного сформовано мету роботи: встановлення взаємодії всіх чинників силового навантаження тіла труби магістрального трубопроводу в процесі виконання ремонтно-відновлювальних робіт по відновленню несучої здатності дільниці трубопроводу, на якій було виявлено різноманітними методами діагностування дефекти металу, які можуть в процесі свого розвитку

привести до повного руйнування та виникнення аварійної ситуації з непередбачуваними наслідками.

Другий розділ присвячено дослідженням механічних і характеристик напружено-деформованого стану в процесі ремонту трубопроводу в траншеї. Дослідження проводилися на основі математичного моделювання процесу. В основу математичної моделі покладено диференціальне рівняння поєдзовжно-поперечного вигину пружної лінії балки:

$$EI(x) \frac{d^4 w}{dx^4} - N(x) \frac{d^2 w}{dx^2} + \alpha(x)w = q(x), \quad (1)$$

де w – прогин трубопроводу по вертикалі; $EI(x)$ – жорсткість трубопроводу на вигин; $N(x)$ – стискуєче поєдзовжне зусилля; $q(x) = q_{sp}(x) + q_{mp}(x)$ – інтенсивність зовнішнього навантаження; $\alpha(x)w$ – реакція основи.

Залежність коефіцієнту податливості ґрунту в часі відображає в даній математичній моделі реологічні процеси ґрунтів (повзучість), які описуються інтегральною теорією лінійної спадкової повзучості Больцмана. Якщо проводити прості випробування зразків при постійних навантаженнях, то принцип Больцмана можна трактувати наступним чином: деформація в момент часу t , яка виникає в результаті послідовного прикладання ряду напружень $\Delta\sigma(\tau_n)$ у попередні моменти часу, є сумою деформацій, які спостерігалися б в даний момент часу t , якби кожне з постійних напружень прикладати незалежно від інших. Податливість матеріалу в момент часу t позначимо $\Pi(t - \tau_n)$. Це означає, що якщо навантаження прикладається ступнево в моменти $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_k$, то деформація в момент $t > \tau_k$ визначиться з виразу:

$$\varepsilon(t) = \Delta\sigma(\tau_1)\Pi(t - \tau_1) + \Delta\sigma(\tau_2)\Pi(t - \tau_2) + \dots + \Delta\sigma(\tau_k)\Pi(t - \tau_k), \quad (2)$$

тобто кожне з напружень, яке діє в тілі в моменти $\tau_n (n=1, 2, \dots, k)$, вносить свій вклад в деформацію, що спостерігається в момент часу $t > \tau_k$.

У наслідок реологічних процесів у ґрунтах виникає зміна співвідношення напружень та деформацій в часі, які можна визначити величиною модуля деформації ґрунту $E_{gp}(t)$

$$E_{gp}(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{E_{gp0}}{1 + \frac{1}{\sigma(t)} \int_{\tau_0}^t K(t-\tau)\sigma(\tau) d\tau}, \quad (3)$$

де $E_{gp0}(t)$ - модуль деформації ґрунту, отриманий в момент $t = 0$.

Рішення (3) обумовлено законом зміни контактних напружень $\sigma(\tau)$ - від реакції ґрунту в часі. Слабосингулярне ядро є достатнім загальним та відповідає всім вимогам:

$$K(t - \tau) = A e^{-\beta(t-\tau)}(t - \tau)^{\nu-1}, \quad (4)$$

Значення параметрів ядра повзучості визначаємо шляхом поєднання експериментальної кривої з теоретичною кривою повзучості. Таким чином, враховано повзучість ґрунту при вертикальному переміщенні трубопроводу.

При розрахунку балки на в'язкопружній основі визначаються тільки поєдзовжні напруження. Насправді при дії внутрішнього тиску в трубі виникають як осеві (повздовжні), так і окружні (кільцеві) напруження.

Розраховуємо НДС при вигині осесиметричної циліндричної оболонки по безмоментній теорії. Для врахування осесиметричного деформування трубопроводу на краях ремонтного котловану застосовуємо напівбезмоментну теорію оболонок В.З. Власова, яка дозволяє визначити додаткові окружні напруження від дії ґрунтів.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_s}{r \partial^2 \varphi} + N_s r - p_x &= 0; & \frac{\partial N_x}{\partial x} r + \frac{\partial S}{\partial \varphi} + p_x r &= 0; \\ \frac{\partial N_s}{\partial x} r + \frac{\partial S}{\partial x} r - Q_s + p_s r &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Невідомі зусилля та моменти системи рівнянь (5) записано в переміщеннях. При постійній жорсткості інтегральних характеристик отримано:

$$\begin{aligned} \frac{D}{r^2} \left(\frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} - \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{B_{11}}{r} \left(W + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - p_x r &= 0; \\ B_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} r + B_{33} \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial \varphi} \right) + p_x r &= 0; \\ \frac{B_{11}}{r} \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + B_{33} r \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi \partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) - \frac{D}{r^2} \left(\frac{\partial^3 W}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + p_s r &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

Для подальшого розв'язання отриманої системи рівнянь необхідне задання граничних умов, що відповідають реальному закріпленню країв оболонки. Отримана система рівнянь реалізується відносно трьох невідомих функцій W , U , V , за відповідних граничних умов.

Сучасні методи ремонту передбачають технологію капітального ремонту газопроводів у траншеї без припинення транспорту газу. Земляні роботи здійснюються послідовно на окремих котлованах, між сусідніми (рисунок 1) залишається земляна призма-перемичка, довжина якої визначається за розробленою спеціальною методикою, що запобігає появі пластичних деформацій труби

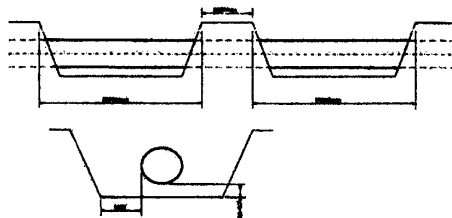


Рисунок 1 – Схема розташування котлованів під час ремонту

Крокова схема виконання робіт зумовлюється необхідністю «жорсткого» зберігання попереднього положення трубопроводу та повного виключення появи додаткових повздовжньо-поперечних напружень в тілі труби. Технологічний процес виконання капітального ремонту окремих локальних ділянок трубопроводу виконується зі зниженням тиску не менш ніж на 10% від

максимального робочого тиску за останній рік експлуатації, а під час ремонту тіла труби – не менш ніж на 30% від максимально дозведеного. Для визначення допустимого прогону l_{cp} за умовою обмеження провису $\Delta_{max} \leq 0,02D_N$, яке може привести до створення «мішків» при застиганні трубопроводу використовується система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{q}{24EI} (l_{cp}^2 x^2 - 2l_{cp} x^3 + x^4) - ix = 0,02D_N \\ \frac{q}{24EI} (2l_{cp}^2 x - 6l_{cp} x^2 + 4x^3) - i = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

де $0,02D_N$ – допустиме значення максимального провису в прогоні; l_{cp} – довжина прогону; x – відстань від лівого кінця прогону до місця з максимальним прогином; $i = h/l_{cp}$ – нахил трубопроводу.

На виробництві, в підрозділах ПАТ «Укртрансгаз», технологію та схеми доопрацьовано та адаптовано до відповідних спеціальних умов роботи на магістральних газопроводах. В УМГ «Київтрансгаз» та в УМГ «Черкаситрансгаз» технологію застосовано при капітальному ремонті МГ «Єлець – Кременчук – Кривий Ріг» та «Диканька – Кременчук – Кривий Ріг». За цією ж технологією виконано земляні роботи в 2011 році на 1871 км МГ «Союз» Ду1400 в Гайсинському ЛВУМГ УМГ «Черкаситрансгаз» проводився капітальний ремонт по заміні ізоляційного покриття. Проведені при ремонтних роботах дослідження показали хорошу адаптацію теоретичного прогнозу з фактичними параметрами.

Третій розділ присвячений дослідженню корозійно-механічним випробуванням трубопровідних сталей.

Для вивчення характеру протікання внутрішньотрубною корозії в газопроводах газотранспортної системи проводились серії механічних і корозійно-механічних випробувань взірців металу з трубопроводів, які знаходилися в експлуатації протягом 1974-2012 рр. Модельні середовища представлені солевими розчинами різної концентрації на основі відбору проб забруднень з трубопроводу при ремонтах. Характеристики матеріалу приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики трубопровідних сталей у різних середовищах

Характеристики матеріалу	Середовище			
	Повітря	1	2	3
Модуль Юнга $E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,023	2,064	2,063	1,97
Границя текучості, МПа	250	245	245	245
Границя міцності, МПа	410	400	400	400

Випробування зразків з матеріалу трубопроводів на повітрі та в рідких робочих середовищах проводили в режимі статичного навантаження чистим

згином з автоматичною реєстрацією прогину зразка та зміни електродного потенціалу за допомогою ЕОМ, використовуючи 24-бітне аналого-цифрове перетворення кількості значень.

Побудовані за результатами досліджень характерні криві повзучості в координатах приріст повзучості $\Delta \varepsilon_{\text{п}}$ – час t , зображено на рисунку 2. Тривалість випробовувань на повітрі визначалася характером та кінетикою процесу в кожному окремому випадку, що дозволило за відносно короткий час виконати серію експериментів та визначити параметри області низькотемпературної повзучості.

Встановлено, що повзучість основного металу в корозійно-активному середовищі, як і на повітрі, носить стадійний характер. Вплив середовища відчутний як на стадії неусталеної так і на стадії усталеної повзучості. Як показали наші дослідження, найбільшу схильність до низькотемпературної корозійної повзучості сталь трубопроводу проявляє у модельному середовищі 2, найменшу – у модельному середовищі 3 (таблиця 1).

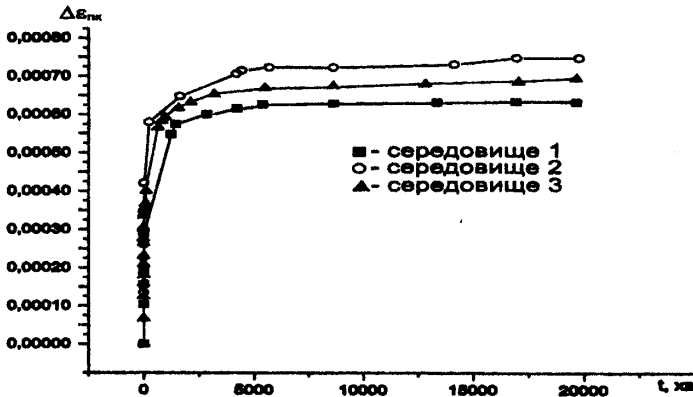


Рисунок 2 – Кінетика повзучості матеріалу трубопроводу в модельних середовищах

З метою кращого вивчення хімізму процесу внутрішньої стрес-корозії сталі трубопроводу та визначення найбільш небезпечного, з хімічної точки зору, експлуатаційного середовища досліджено кінетику електродного потенціалу. Відомо, що чим нижчий потенціал металу та чим швидший процес розблагородження, тим більша ймовірність перебігу корозійних процесів і, відповідно, небезпека виникнення корозійних уражень.

Для того, щоб визначити реальний ступінь небезпеки при експлуатації трубопроводу, у кожному з модельних середовищ вивчено кінетику корозійних процесів в них і визначено швидкості протікання корозії та зменшення товщини стінки труби.

Як бачимо, навіть при мінімальному рівні напружень зменшення товщини стінки труби може сягати від 0,125 до 1,25 мм/рік залежно від хімічного складу середовища. Встановлено, що із збільшенням величини номінальних напружень

від $1,05 \sigma_{0,2}$ до $1,6 \sigma_{0,2}$ збільшення загальної швидкості корозії у модельних середовищах може сягати 25 %.

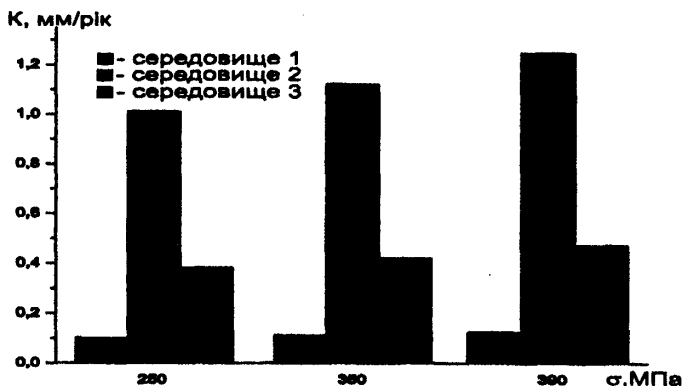


Рисунок 3 – Залежність зменшення товщини стінки трубопроводу від рівня номінальних напружень для різних модельних середовищ

При визначенні залишкового ресурсу трубопроводів необхідно також враховувати постійний інтенсивний рух корозійного середовища, при якому:

- проходить постійне змивання нерозчинних продуктів корозії, тобто погіршується пасивація поверхні;
- проявляється схильність до локалізації корозійних процесів через те, що початково уражене місце не може пасивуватись, а тому постійно має менший потенціал від сусідніх неуражених ділянок;
- утворюється гальванічний елемент, у якому уражена ділянка стає анодом, а неуражена – катодом.

Враховуючи, що за несприятливих умов механічний чинник та чинник руху середовища будуть взаємно підсилювати корозійні процеси, нескладно підрахувати, що швидкість локальної корозії, і, відповідно, величина зменшення товщини стінки можуть збільшитися в 2,5 – 10 разів у порівнянні з наведеними даними.

В четвертому розділі приведено результати досліджень з використання компенсаційних муфт для зниження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу при проведенні ремонтних робіт.

Для вдосконалення методів розрахунку несучої здатності ділянок магістральних трубопроводів, які ремонтуються з використанням муфтових технологій, поставлені та вирішені наступні завдання:

- дослідження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу в різні періоди проведення ремонтних робіт, пов'язаних із встановленням підсилюючої муфти;
- побудова математичної моделі деформування двошарової конструкції муфти при осесиметричному напруженні;

- розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану муфти при різних способах її встановлення на поверхні трубопроводу, що ремонтується;
- оцінка міцності ділянки трубопроводу, відремонтованої за муфтовою технологією.

В процесі дослідження визначається зміна напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу, що змінює своє проектне положення в результаті створення ремонтного котловану.

У запропонованій математичній моделі вигин композитної муфти розглядається при осесиметричному навантаженні з урахуванням роботи міжшарових зв'язків. Представлена форма запису диференціальних рівнянь у переміщеннях, при цьому завдання розглянуто в лінійній постановці.

Отримані диференціальні рівняння рівноваги складової двошарової композитної муфти з урахуванням жорсткості міжшарових зв'язків мають вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dx} \left(B_{11}^{(1)} \frac{du_0^1}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left(B_{12}^{(1)} w \right) \frac{1}{r} + p_x^{(1)} - \eta \left(c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) = 0; \\ & \frac{d}{dx} \left(B_{11}^{(2)} \frac{du_0^2}{dx} \right) + \frac{d}{dx} \left(B_{12}^{(2)} w \right) \frac{1}{r} + p_x^{(2)} + \eta \left(c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) = 0; \\ & \frac{d^2}{dx^2} \left(D_0 \frac{d^2 w}{dx^2} \right) + \left[\frac{du_0^1}{dx} B_{12}^{(1)} + \frac{du_0^2}{dx} B_{12}^{(2)} + \frac{w}{r} \left(B_{11}^{(1)} + B_{11}^{(2)} \right) \right] \frac{1}{r} - \\ & - \frac{a}{dx} \left[\eta \left(c \frac{dw}{dx} + u_0^{(2)} - u_0^{(1)} \right) \right] = P \end{aligned} \quad (8)$$

де η - коефіцієнт жорсткості зв'язків зсуву між шарами, який залежить від способу закріплення муфти (зварювання, м'яка прокладка) на поверхні трубопроводу, що ремонтується; u_0^i ($i=1,2$) - переміщення в серединних поверхнях труби і муфти уздовж твірної; w - поперечні зміщення точок серединної поверхні всього пакету; c - відстань між серединними поверхнями шарів, що лежать по обидві сторони шва; P - внутрішній тиск; B_{11}^i, B_{12}^i, D^i - інтегральні характеристики жорсткості розтягування - стиснення і вигину.

Система рівнянь (6) є замкнутою і вирішується, щодо трьох невідомих функцій $u_0^{(1)}, u_0^{(2)}$ и w .

Завдання вирішувалось методом скінчених різниць при кінцевій жорсткості міжшарових зв'язків з використанням відповідних операторів переходу від диференціальних рівнянь до дискретних.

Дослідження проводилися при використанні обтискнутої муфти, встановленої через м'які прокладки ($\eta=0$), та для приварної муфти ($\eta=\infty$) за різних граничних умов.

При встановленні напівмуфт через пружний шар (нульова жорсткість міжшарового зв'язку $\eta = 0$) має місце зсув по поверхні контакту з трубопроводом. У цьому випадку гіпотеза прямих нормалей виконується тільки для кожного окремого шару.

Картина розподілу нормальних напружень уздовж твірної по довжині муфтового з'єднання показана у вигляді двох кривих (рисунок 4). Це пов'язано з тим, що напруження в шарах труби і муфти при нульовій жорсткості міжшарових зв'язків різні.

За відсутності зміщення між шарами по поверхні контакту ($\eta = \infty$) має місце симетричний напружений стан, щодо серединної поверхні пакета двох шарів.

Порівняння напружень в шарах конструкції показує, що при виконанні приварної муфти поздовжні напруження в трубопроводі збільшуються до 30%. Тому, для зменшення рівня напруженого стану муфтового з'єднання, необхідно забезпечити максимальну податливість по поверхні контакту між трубопроводом і муфтою.

Вплив переміщень на крайках муфтової конструкції на рівень напружень зроблено без урахування внутрішнього тиску ($P = 0$). Виявлено, що переміщення кромки на 0,5 мм дає збільшення напруження до 140 МПа.

Результати розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням тільки вигину муфтового з'єднання від внутрішнього тиску представлені на рисунку 4.

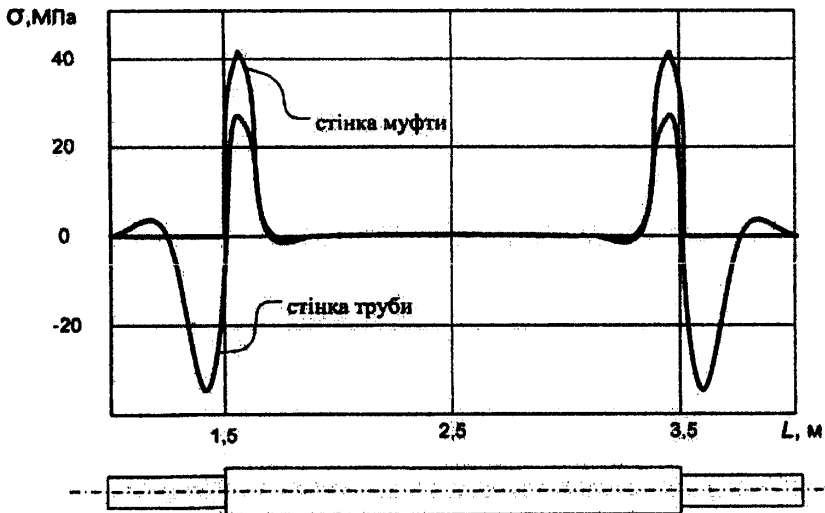


Рисунок 4 – Розподіл нормальних напружень вигину від внутрішнього тиску по довжині муфтової конструкції для обтискнутої муфти

При встановленні ремонтної муфти вважаємо, що ремонтний тиск в трубопроводі знижений на 30%. Після встановлення муфти тиск піднімається знову до робочого значення, при цьому тиску кільцеві напруження визначалися в стінках трубопроводу та ремонтній муфті.

Результати розрахунку еквівалентних та окружних напружень наведено на рисунку 5.

Розвантажувальний ефект муфти становить 18,8%, тобто напруження в трубі знижуються приблизно в 1,2 рази. У зоні ж примикання трубопроводу до країв муфти виникає напруження внаслідок граничного ефекту, що перевищує кільцеве на 8,3%.

Вирішено завдання встановлення деформованого стану ділянки трубопроводу при капітальному ремонті з урахуванням основних параметрів і впливів та розглянуто напружено-деформований стан ремонтної муфти від внутрішнього тиску. При цьому враховано, що поздовжні напруження визначаються двома факторами: вигином самого трубопроводу при створенні ремонтного котловану і внутрішнім тиском. У результаті встановлення муфти значення еквівалентних напружень у тілі трубопроводу, що примикає до країв муфти, зросли на 19,3%. Величина цього напруження буде зростати зі збільшенням довжини ремонтного котловану і величини осевого зусилля стиснення трубопроводу, оскільки буде зростати складова напруження поздовжньо-поперечного вигину.

$\sigma_{\text{екв}}$, МПа

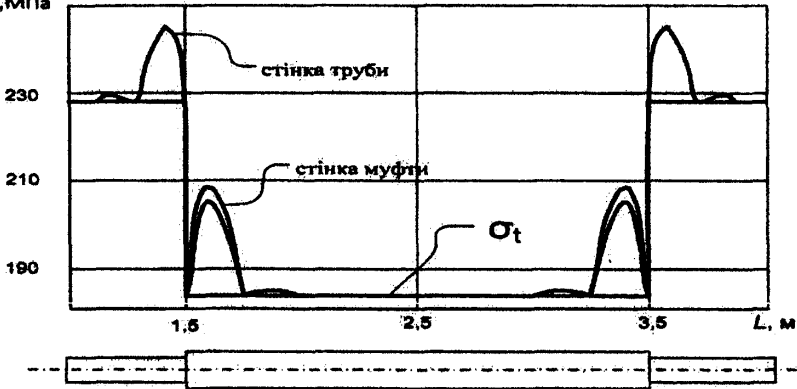


Рисунок 5 – Розподіл еквівалентних і кільцевого напружень по довжині муфтової конструкції для обтискної муфти

Оцінку міцності відремонтованої ділянки трубопроводу виконано, виходячи із загальних принципів безпеки робіт технічних пристроїв залежно від категорії ділянки, ступеня деградації металу труб, ступеня небезпечності дефектів труб. При цьому визначалися еквівалентні напруження, які не повинні перевищувати відповідних значень.

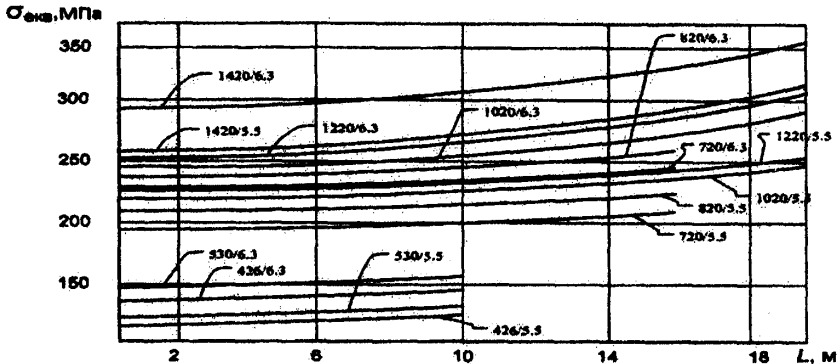


Рисунок 6 – Зміна еквівалентних напружень в стінці трубопроводу у кромці муфти в залежності від довжини котловану

Величина еквівалентного напруження буде змінюватися в залежності від довжини ремонтного котловану (рисунок 6). Розрахунки показують, що встановлення ремонтної муфти розвантажує стінку трубопроводу під муфтою на 22%. У той же час, встановлення муфти призводить до зростання напруження на 26% у зоні, що примикає до кромки муфти.

Розроблена методика розрахунку ділянки трубопроводу дозволяє оцінити його міцність в період проведення ремонтних робіт при різних жорсткісних характеристиках основи ґрунту, при різній довжині ремонтного котловану і діючих осьових зусиллях.

Для приварної муфти напруження вздовж твірної від вигину на 30% більше у порівнянні з обтисковою муфтою, де закріплення здійснюється через м'яку прокладку.

Виявлено, що початкові недосконалості геометричних форм на краях напівмуфт істотно змінюють значення напружень в трубопроводі. Для обтискових муфт на трубопроводі, діаметром 1020 мм зміщення кромки на 0,5 мм дає збільшення напруження до 140 МПа.

Встановлення ремонтної муфти і зміна проектного положення ділянки трубопроводу призводять до підвищення еквівалентних напружень до 26% у ремонтваній зоні, прилеглої до країв муфти, що значно послаблює стінку трубопроводу.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень напружено-деформованого стану лінійних ділянок трубопроводу в процесі ремонту вирішено важливу наукову задачу встановлення закономірностей впливу навантажень на характеристики міцності матеріалу труби в залежності від характеристик системи та зовнішніх

впливів, що дозволило запропонувати методи ремонту ділянок лінійної частини, а саме:

1. Досліджено зміну напружено-деформованого стану ремонтної ділянки трубопроводу на основі як традиційної стержневої теорії, так і напівбезмоментної теорії тонких оболонок при взаємодії конструкцій з ґрунтом при змінному коефіцієнті постелі в часі на краях ремонтного котловану. Дослідження повзучості ґрунтів дозволили вдосконалити математичну модель взаємодії оболонки трубопроводу з довкіллям для прогнозування надійності.

2. Запропоновано і науково обґрунтовано застосування методу земляних перемичок у процесі капітального ремонту лінійних ділянок газопроводу в траншеї. Розроблена методика розрахунку ділянки трубопроводу дозволяє оцінити його міцність в період проведення ремонтних робіт при різних жорсткісних характеристиках основи ґрунту, довжині ремонтного котловану і діючих осьових зусиль.

3. Визначено основні чинники, які зумовлюють характер і швидкість перебігу процесів внутрішньої корозії трубопроводів, а саме: наявність відчутних механічних напружень, хімічний склад і рух корозійного середовища. Виявлено, що навіть в найбільш безпечному середовищі швидкість корозії досить значна, і зменшення товщини стінки з урахуванням локалізації процесу може становити від 1 до 1,25 мм/рік.

4. Запропоновано і аналітично досліджено метод розвантаження НДС ділянки трубопроводу з застосуванням компенсаційних муфт. Для приварної муфти напруження вздовж твірної від вигину на 30% більше у порівнянні з обтисковою муфтою, де закріплення здійснюється через м'яку прокладку. Виявлено, що початкові недосконалості геометричних форм на краях напівмуфт істотно змінюють значення напружень в трубопроводі. Для обтискових муфт на трубопроводі, діаметром 1020 мм, зміщення кромки на 0,5 мм дає збільшення напруження до 140 МПа. Встановлення ремонтної муфти і зміна проектного положення ділянки трубопроводу зумовлюють підвищення еквівалентних напружень до 26% у ремонтній зоні, прилеглий до країв муфти, що значно послаблює стінку трубопроводу. Впровадження запропонованих технічних рішень і технологій в умовах ремонту газопроводів УМГ «Черкаситрансгаз» показало їх високу ефективність.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних працях:

1. Ніколаєв В.В. Корозійно-механічні випробування трубної сталі для прогнозування ресурсу нафтопроводів / В.В.Ніколаєв // Нафтогазова галузь України. – 2012. – № 2(32). – С. 43-47.
2. Ніколаєв В.В. Характер зміни НДС трубопроводу в місці встановлення підсилюючих муфт / В.В.Ніколаєв // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. ІЕЗ ім. Є.О. Патона. –2014. – № 02. – С. 27-30.

3. Ніколаєв В.В. Визначення НДС ремонтної ділянки трубопроводу /В.В.Ніколаєв, О.Ф. Іткін // Вісник Кременчуцького національного Університету ім. М. Островського. – 2014. - № 3(86). – С. 110-114.
4. Ніколаєв В.В. Математична модель формування ареалу забруднень витоками нафтопродуктів / В.В.Ніколаєв //Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. - № 2(32). – С. 156-159.
5. Пат. 83789 Україна, МПК F16L 55/18 Спосіб поновлення несучої здатності лінійних та вигнутих ділянок діючого трубопроводу І.В.Лохман, А.С. Мандра, К.А. Ющенко, В.С. Бут, М.В. Кучерук, А.А. Мандра, В.В. Ніколаєв, О.П. Подолян С.В. Пудрій, О.А. Томашук; № а200806461; заявл.14.05.2008 ; опуб,11.08.2008.Бюл.№15 – 7с.
6. Пат. 82038 Україна, МПК F16I 55/00 G01M 3/00 Спосіб муфтового ремонту дефектної ділянки діючого трубопроводу з контролем якості монтажу. В.С. Бут, І.В.Лохман, А.С. Мандра, М.В Кучерук, А.А. Мандра, В.В. Ніколаєв, О.П.Подолян, С.В. Пудрій; №а200713222; заявл.27.11.2007; опуб,25.02.2008.Бюл.№4 –4с.
7. Ніколаєв В.В. Досвід ідентифікації та ліквідації дефектів тіла труби, виявлених при ВТД / В.В.Ніколаєв // Науково-технічна нарада «Підвищення надійності та ефективності роботи лінійної частини магістральних трубопроводів ГТС ДК «Укртрансгаз», м. Яремча, 2010 р. – С. 17-20.
8. Ніколаєв В.В. Проведення досліджень та ремонту дефектів, виявлених на газопроводах УМГ «Черкаситрансгаз» / В.В. Ніколаєв // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, 2012 р. – С. 223-225.
9. Ніколаєв В.В. Ремонтні роботи на МГ без зупинки транспорту газу /В.В. Ніколаєв // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика», ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, 2013 р. – С. 437-439.

АНОТАЦІЯ

Ніколаєв В.В. Удосконалення методів ремонту трубопроводів на основі оцінки їх напружено-деформованого стану – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2014.

Дисертація присвячена вивченню закономірностей напружено-деформованого стану ділянок газопроводів у процесі їх ремонту з застосуванням компенсаційних муфт. Виконано аналітичні дослідження механічних характеристик напружено-деформованого стану в процесі ремонту трубопроводу в траншеї, експериментальні дослідження корозійно-механічних випробувань трубопровідних сталей, запропоновано використання компенсаційних муфт для зниження напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу при проведенні ремонтних робіт.

Ключові слова: напружено-деформований стан, корозійно-механічні показники міцності матеріалу труб, компенсаційна муфта, розвантаження.

АННОТАЦИЯ

Николаев В.В. Совершенствование методов ремонта трубопровода на основе оценки их напряженно-деформируемого состояния - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2014.

Диссертация посвящена изучению закономерностей напряженно-деформированного состояния участков газопроводов в процессе их ремонта с применением компенсационных муфт. Выполнены аналитические исследования механических характеристик напряженно-деформированного состояния в процессе ремонта трубопровода в траншее, экспериментальные исследования коррозионно-механических испытаний трубопроводных сталей, предложено использование компенсационных муфт для снижения напряженно-деформированного состояния участка трубопровода при проведении ремонтных работ.

Исследованы изменения напряженно-деформированного состояния ремонтного участка трубопровода выполнены на основе как традиционной стержневой теории, так и полубезмоментной теории тонких оболочек при взаимодействии конструкций с грунтом при переменном коэффициенте постели во времени на краях ремонтного котлована. Исследование ползучести грунтов позволили усовершенствовать математическую модель взаимодействия оболочки трубопровода с окружающей средой с целью прогнозирования надежности. Предложено и научно обосновано применение метода земляных перемычек в процессе капитального ремонта линейных участков газопровода в траншее.

Обнаружено, что даже в наиболее безопасной среде скорость коррозии весьма значительна, и уменьшение толщины стенки, с учетом локализации процесса и может составлять от 1 до 1,25 мм / год. Определены основные факторы, предопределяющие характер и скорость протекания процессов внутренней коррозии трубопроводов, а именно - наличие осязательных механических напряжений, химический состав и движение коррозионной среды.

Разработана методика расчета участка трубопровода позволяет оценить его прочность в период проведения ремонтных работ при различных характеристиках грунта, длине ремонтного котлована и действующих осевых усилий. Выявлено, что начальные несовершенства геометрических форм на краях полумуфт существенно изменяют значения напряжений в трубопроводе.

Предложен и аналитически исследован метод разгрузки НДС участка трубопровода с применением компенсационных муфт. Для приварной муфты напряжения вдоль образующей от изгиба на 30% больше по сравнению с обжимной муфтой, где закрепление осуществляется через мягкую прокладку. Установка ремонтной муфты и изменение проектного положения участка трубопровода приводят к повышению эквивалентных напряжений до 26% в ремонтной зоне, прилегающей к стенке трубопровода. Внедрение технических решений и



технологий в условиях ремонта газопроводов УМГ «Черкасытрансгаз» показало их высокую эффективность.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, коррозионно-механические показатели прочности материала труб, компенсационная муфта, разгрузка.

ABSTRACT

Nikolaev V.V. Perfection of methods of repair of pipeline on the basis of estimation of their tensely-deformed state. - Manuscript.

Thesis for a degree of candidate of technical sciences on a specialty 05.15.13 - Pipeline transportation, oil and gas storage Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2014.

The thesis is devoted to studying patterns of stress-strain state in the areas of pipeline repair using compensating couplings. Analytical study of the mechanical characteristics of the stress-strain state in the process of repairing the pipeline in the trench, experimental studies of corrosion-mechanical test pipeline steels, suggested the use of compensatory joints to reduce stress-strain state section of the pipeline during repair work.

Keywords: mode of deformation, corrosion-mechanical properties of the material of pipes, coupling compensation, discharge.