

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ТРУБОПРОВОДУ ПІД ЧАС ПЕРЕІЗОЛЯЦІЇ В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ

Ю. Г. Мельниченко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)42157,  
e-mail: snp@nung.edu.ua

Проаналізовано методику розрахунку напруженого стану трубопроводу, вісь якого має нахил до горизонту, під час його переізоляції. Показано, що залежності для нахилених трубопроводів відрізняються від залежностей для горизонтальних ділянок і для розрахунку напружень необхідно використовувати наближені методи.

Ключові слова: трубопровід, гірська місцевість, поздовжній схил, заміна ізоляції

Проанализировано методику расчета напряженного состояния трубопровода с наклоном к горизонту при замене изоляции. Показано, что зависимости для наклонных участков отличаются от зависимостей для горизонтальных участков и для расчета напряжений необходимо использовать приближенные методы.

Ключевые слова: трубопровод, горная местность, продольный склон, замена изоляции

Methods of deflected mode calculation of pipelines with longitudinal slopes during its coating replacement are analyzed. It is shown, that relations for pipeline slopes differs from relations for horizontal sections and for calculation of tensions approximate methods must be used.

Key words: pipeline, mountain area, longitudinal slope, coating replacement

Технологія заміни ізоляційного покриття магістральних газопроводів без зупинки транспортування продукту є надзвичайно необхідна для галузі. На сучасному етапі як техніка, так і теоретична база для даної технології розроблена і впроваджена в практику [1, 2, 3]. Крім того, досліджене питання обґрунтування вибору максимальної відстані між земляними перемичками для ділянки трубопроводу, на якій виконується переізоляція без залучення підтримуючих машин та механізмів [4], однак усі розглянуті праці присвячені роботі трубопроводу у нормальних умовах проходження траси.

Частина магістральних газопроводів вітчизняної ГТС проходить в гірських умовах, для яких допускається застосовувати загальноприйняті технології переізоляції магістральних трубопроводів з певними особливостями [3]. Ці особливості здебільшого стосуються закріплення ремонтних машин на поздовжніх схилах для недопущення їх сповзання і не стосуються безпосередньо технології виконання робіт.

Модель трубопроводу, защемленого в ґрунті на поздовжніх схилах може бути представлена на рисунку 1.

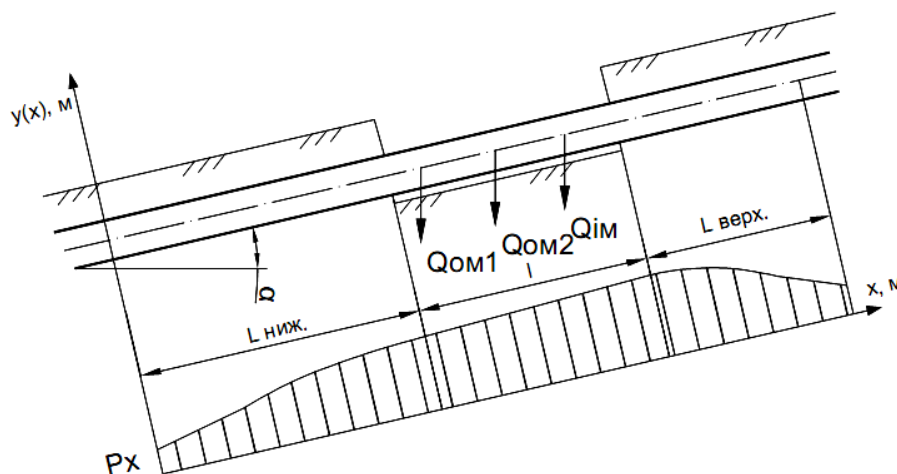


Рисунок 1 – Розподіл поздовжніх зусиль в трубопроводі під час переізоляції на поздовжніх схилах

Об'єктом дослідження є капітальний ремонт ділянок магістральних трубопроводів на поздовжніх схилах без зупинки транспортування продукту та без підймання трубопроводу. Крім того передбачається, що трубопровід повинен бути розкритий на максимально можливу довжину за умови, що трубопровід може утримуватись самостійно (без залучення підтримуючих механізмів).

Для горизонтального трубопроводу, який є заземлений в ґрунті й розкритий на певну довжину, можна розраховувати напружено-деформований стан як для однопрогінного балкового переходу без компенсаторів [5]. Однак на поздовжніх схилах умови заземлення трубопроводу на обох краях ділянки є не однакові. Це зумовлено в першу чергу різною поздовжньою силою, спричиненою проекцією ваги трубопроводу у сукупності з навантаженнями від ваги продукту (особливо для магістральних нафтопроводів) та ремонтних машин на його вісь (у верхній точці зусилля буде більшим, ніж у нижній [4]). Тому методику для однопрогінного балкового переходу без компенсаторів для даного випадку застосовувати неправомірно.

Для визначення розподілу згинного моменту по довжині трубопроводу необхідно розв'язати наступну систему рівнянь [3]:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4(y(x))}{dx^4} + P(x) \cdot \frac{d^2(y(x))}{dx^2} = q(x), \quad (1)$$

$$M_z(x) = -E \cdot I \cdot \frac{d^2(y(x))}{dx^2}, \quad (2)$$

де  $E$  – модуль пружності;  $I$  – момент інерції перерізу труби;  $x$  – поздовжня координата;  $M_z(x)$  – згинний момент в трубопроводі;  $P(x)$  – результуюча поздовжня сила на ділянці  $dx$ ;  $y(x)$  – зміщення трубопроводу по перпендикуляру відносно його початкового положення;  $q(x)$  – поперечне навантаження на одиницю довжини ділянки. Якщо на відрізьку  $dx$  наявні поперечні зосереджені сили, то

$$q(x) = \frac{-q_{mp}(x) \cdot dx + q_{cp}(y(x)) \cdot dx + \sum Q_i \cdot \cos(\alpha)}{dx}, \quad (3)$$

де  $q_{mp}(x)$  – сумарна вага одиниці довжини трубопроводу, включно з вагою труби, продукту, ізоляційного покриття, баластування та футировування, та вага ґрунту над одиницею довжини трубопроводу;  $\alpha$  – кут нахилу трубопроводу до горизонту;  $\sum Q_i$  – сума поперечних зосереджених сил на ділянці  $dx$ ;  $q_{cp}(y(x))$  – реакція опори ґрунту на одиницю довжини трубопроводу.

Вважаємо, що в непорушному стані реакція опори ґрунту рівна сумарній вазі трубопроводу, тому реакція опори є функцією від вертикального зміщення трубопроводу

$$q_{гр}(y(x)) = C \cdot y(x), \quad (4)$$

де  $C$  – коефіцієнт постелі ґрунту;  $y(x)$  – поперечне зміщення трубопроводу від початкового стану.

Перше рівняння системи є нелінійним, оскільки величина  $P(x)$  залежить від аргументу рівняння, тому для його розв'язання необхідно використати один з наближених методів. Існує методика розрахунку напруженого стану розкритої для переізоляції ділянки трубопроводу з використанням методу сіток[3], яка і взята за основу, розроблена однак для рівнинної ділянки. Крім того, в згаданій праці система (1)-(2) розв'язується аналітично з припущенням що величина  $P(x)$  не залежить від аргументу  $x$ .

Числовий метод, запропонований у [3], дає адекватні рішення за умови вибору кроку апроксимації часткових похідних різницевиими аналогами у певних межах. Тут же для ділянки трубопроводу довжиною 40 метрів кількість точок трубопроводу вибрано у кількості 30 при рекомендованій кількості не менше 10.

Розпишемо рівняння (1) з використанням різницевих аналогів

$$EI \frac{V_{i+2} - 4V_{i+1} + 6V_i - 4V_{i-1} + V_{i-2}}{\Delta x^4} + P(x) \frac{V_{i-1} - 2V_i + V_{i+1}}{\Delta x^2} = q(x), \quad (5)$$

відповідно

$$V_i = \frac{1}{\frac{6EI}{\Delta x^4} + \frac{2P(x)}{\Delta x^2}} \times \left[ q(x) - P(x) \frac{V_{i-1} + V_{i+1}}{\Delta x^2} - EI \frac{V_{i+2} - 4V_{i+1} - 4V_{i-1} + V_{i-2}}{\Delta x^4} \right]. \quad (6)$$

Результуюча поздовжня сила  $P(x)$  визначається за наступною залежністю:

$$P(x) = (0.25 \cdot \sigma_{\text{кільц}} + \sigma_t) \cdot F + q(x - L_{\text{ниж}}) \cdot (x - L_{\text{ниж}}) \cdot \text{tg } \alpha - E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (7)$$

де  $\sigma_{\text{кільц}}$  - кільцеві напруження в трубопроводі, спричинені внутрішнім тиском;  $\sigma_t$  - поздовжнє напруження в трубопроводі, спричинене різницею температур між температурою укладання трубопроводу та температурою повітря під час ремонту;  $x$  - відстань від точки визначення

поздовжнього зусилля до нижчого початку зони пружного опору ґрунту поздовжнім переміщенням трубопроводу;  $F$  - площа перерізу тіла труби;  $l$  - довжина розкритої ділянки трубопроводу;  $\Delta l$  - сума переміщень межі між загорнутої і не загорнутої частини трубопроводу на обох кряях внаслідок втрати стійкості в поздовжньому напрямку суміжних до розкритої ділянок трубопроводу;  $L_{\text{ниж}}$  - довжина нижньої ділянки трубопроводу, яка є защемлена в ґрунті. В першому наближенні приймаємо  $L_{\text{ниж}} = l$ .

Методика розрахунку поздовжнього переміщення межі між загорнутою та не загорнутою ділянками аналогічна випадку защемлення трубопроводу на горизонтальній ділянці [5]. При цьому необхідно окремо розраховувати зону з пружною і пластичною деформацією ґрунту.

Повне поздовжнє переміщення кінцевого перерізу трубопроводу на межі між ґрунтом та траншеєю визначається за формулою [5]

$$U = \frac{\tau_{ep}}{k_u} + \frac{P^2 - P_{\text{нов}}^2}{2p_o EF}, \quad (8)$$

де  $k_u$  - коефіцієнт постелі ґрунту при зсуві;  $p_o$  - опір ґрунту поздовжнім переміщенням одиниці довжини трубопроводу;  $P_{\text{нов}}$  - граничне поздовжнє зусилля в трубопроводі, при якому по контакту труба-ґрунт має місце пружний зв'язок, рівне

$$P_{\text{нов}} = \frac{\tau_{ep} \beta EF}{k_u}, \quad (9)$$

де  $\tau_{ep}$  - граничне дотичне напруження по контакту трубопроводу з ґрунтом

$$\tau_{ep} = \sigma g \varphi_{ep} + c'_{ep}, \quad (10)$$

$\sigma$  - середні нормальні напруження в ґрунті по контакту системи труба-ґрунт;  $\varphi_{ep}$  - кут внутрішнього тертя ґрунту;  $c'_{ep}$  - відновлювальна частина зчеплення ґрунту при ковзанні труби;  $\beta$  - коефіцієнт, який рівний

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi D_3 k_n}{EF}}. \quad (11)$$

Поздовжнє зусилля, яке виникає в трубопроводі, розподіляється по довжині розкритої ділянки рівномірно. Відповідно, внаслідок переміщення перерізу трубопроводу поздовжнє зусилля у трубопроводі зміниться на величину

$$\Delta P = \frac{\Delta l}{l} E \cdot F = \frac{(U_{\text{ниж.}} + U_{\text{верх.}})}{l} E \cdot F, \quad (12)$$

де  $U_{\text{ниж.}}$ ,  $U_{\text{верх.}}$  - відповідно поздовжнє переміщення границі між загорнутою і не загорнутою частиною труби у нижчій та вищій точці відповідно. Кожна з цих величин визначається за формулою (9) з використанням відповідного значення  $P$ . Після визначення  $\Delta P$  уточнюється значення поздовжнього зусилля на провисаючій частині труби за формулами

$$P(x) = P(x) - \Delta P. \quad (13)$$

Після уточнення визначаємо довжини ділянок трубопроводу, на яких відбуваються поздовжні зміщення трубопроводу у ґрунті у верхній та нижній точці

$$L_{\text{ниж}} = \frac{P(L_{\text{ниж}})}{\pi \cdot D_3 \cdot \tau_{\text{сп}}}; \quad L_{\text{верх}} = \frac{P(L_{\text{ниж}} + l)}{\pi \cdot D_3 \cdot \tau_{\text{сп}}}. \quad (14)$$

Ці довжини використовуємо для визначення довжини ділянки, для якої проводимо розрахунок вертикальних зміщень трубопроводу за рекурентною формулою (6).

Наведені формули дозволяють отримати розподіл вертикальних зміщень трубопроводу по довжині нахиленої ділянки. За формулою (2), розписаною через різницеві аналоги з тим самим кроком розбиття по довжині, можна отримати розподіл згинних моментів по довжині. Даний метод є простим та наглядним, може бути використаний у навчальному процесі для підготовки фахівців з капітального ремонту магістральних трубопроводів, однак потребує апробації та підтвердження достовірності отриманих результатів за експериментальними вимірюваннями або з використанням сучасних програмних комплексів (наприклад Ansys, Comsol, FemLab), призначених для розрахунку напруженого стану тривимірних конструкцій.

### Література

1. Халлыев Н.Х., Будзуляк Б.В., Алимов С.В., Тютнев А.М. Комплексная механизация капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов / Под ред. Халлыева Н.Х.: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., «Издательский дом Недр», 2010. – 168 с.: ил.
2. Мусійко В.Д., Кузьмінець М.П. Проблеми створення технології та техніки для виконання земляних робіт під час капітального ремонту промислових трубопровідних магістралей. // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Всеукраїнський збірник наукових праць №70, КНУБА. – Київ, 2007. – С. 56 – 64.
3. Гумеров А.Г., Зубаиров А.Г., Векштейн М.Г., Гумеров Р.С., Азметов Х.А. Капитальный ремонт подземных нефтепроводов. - М.: 000 "Недра-Бизнесцентр", 1999. - 525 с.: ил.
4. Гідзяк І.П., Гідзяк М.І. Організація і технологія будівництва трубопроводів у складних умовах. Частина III: Конспект лекцій. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 174 с.
5. Дорошенко Я.В. Спорудження магістральних трубопроводів: Підручник / Я.В. Дорошенко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 563 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.06.12

Рекомендована до друку оргкомітетом  
міжнародної науково-технічної конференції  
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,  
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.