Діагностична оцінка міцності надземного переходу нафтопроводу в стані тривалої експлуатації

© **А.В. Андрусяк**
pirelliandgoodri@ukr.net
ІФНТУНГ

УДК 622.692; 539.3

У статті розглянуто методику діагностичної оцінки міцності надземних переходів нафтопроводів, які споруджують у гірських районах. Здійснено математичну постановку та отримано аналітичні розв'язки крайової задачі, яка описує поведінку надземного переходу нафтопроводу під дією експлуатаційних навантажень. Застосовано удосконалений експрес-метод визначення реальних характеристик міцності матеріалу труб у польових умовах. Остаточну діагностичну оцінку міцності здійснено за енергетичним критерієм.
Ключові слова: надземний перехід, трубопровід, пружна основа, тривала експлуатація.

В статье рассмотрена методика диагностической оценки прочности надземных переходов нефтепроводов, которые сооружают в горных районах. Осуществлена математическая постановка и получено аналитическое решение краевой задачи, которая описывает поведение надземного перехода нефтепровода под действием эксплуатационных нагрузок. Применен усовершенствованный экспресс-метод определения реальных характеристик прочности материала труб в полевых условиях. Окончательная диагностическая оценка прочности осуществлена за энергетическим критерием.
Ключевые слова: надземный переход, трубопровод, упругая основа, длительная эксплуатация.

The article considers the methodology for diagnostic evaluation of the strength of oil pipeline aboveground passages constructed in mountainous areas. It is given the mathematical formulation and obtained analytical solutions of the boundary problem describing the behavior of an oil pipeline aboveground passage under maintenance loads. An improved rapid method of determining real characteristics of the pipe material strength in the field is applied. The final diagnostic evaluation has been performed by energy strength criterion.
Key words: aboveground passage, pipeline, elastic foundation, continuous use.

У практиці спорудження нафтопроводів у гірських районах часто застосовують надземні балкові переходи. Вони виявилися найдешевшими для проведення будівельних робіт та простими й зручними в експлуатації [1–3]. Разом із цим потрібно зауважити, що переходи магістральних трубопроводів – це високонавантажені конструкції, оскільки ще на етапі проектування з метою економії матеріалу в них закладаються досить низькі, порівняно з іншими галузями, коефіцієнти запасу міцності [4]. У разі значного віку нафтопроводу ці коефіцієнти запасу можуть знижуватися, що підвищує ризик аварій [5]. Тому під час оцінкових розрахунків на міцність потрібно намагатися урахувати всі суттєві фактори, які впливають на поведінку переходу нафтопроводу, у тому числі й фактор тривалої експлуатації. Розвиток методів оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів нафтопроводів є актуальною практичною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню безпеки трубопровідних систем.

Аналіз сучасних досліджень та публікацій вказує на те, що в інженерній практиці розвиваються два глобальні напрями щодо оцінки міцності надземних переходів нафтопроводів.

Перший напрям полягає у побудові спрощених механіко-математичних моделей, поведінку яких можливо описати аналітично, використовуючи класичні засоби механіки деформівного твердого тіла [1, 2, 6–9]. Тут зазвичай надземний перехід моделюють балкою, яка жорстко закріплена з обидвох боків [2, 6–9]. У механіці таку модель називають «жорсткою моделлю». Зрозуміло, що такий підхід суттєво спрощує задачу, але разом із цим призводить до неточностей розрахунку, оскільки така «жорстка модель» не дає змоги жодним чином врахувати вплив на міцність надземного переходу властивостей ґрунтової основи, на яку опирається трубопровід.

Другий напрям досліджень полягає у використанні для опису напружень і деформацій у надземних та підземних ділянках нафтопроводів числових методів [10–13]. Найчастіше дослідники використовують метод скінченних елементів та універсальні пакети програм для автоматизованих інженерних розрахунків ANSYS, SolidWorks, Nastran чи програми, що спеціалізуються на

вузькому колі задач, наприклад «3D PipeMaster». У таких випадках масив ґрунту задається лінійними або нелінійними реакціями жорсткості, яку можна визначити. Реакції встановлюються у кожному вузлі схеми трубопроводу. Основна проблема використання числових методів – це визначення функцій опору ґрунту [12, 13].

У представленому дослідженні автори ставили за мету:

- побудувати таку механіко-математичну модель надземного переходу нафтопроводу, за допомогою якої можна коректно врахувати вплив на міцність споруди властивостей ґрунтової основи і при цьому отримати прості аналітичні результати;
- дослідити вплив тривалої експлуатації переходу нафтопроводу на механічні характеристики матеріалу труб і врахувати фактор зміни характеристик міцності та пружності в діагностичному розрахунку.

Постановка задачі

Розглянемо схему однопрогонового надземного переходу нафтопроводу (рис. 1). Перехід складається із надземної ділянки BC завдовжки 2*l* та прилеглих до неї підземних ділянок *AB* та *CK*, які опираються на ґрунтову основу. Довжини підземних ділянок значно більші за надземну частину. Уведемо локальні системи декартових координат (див. рис. 1), сумістивши їх початки відповідно із серединою надземної ділянки *BC* та із лівим краєм підземної ділянки *CK*.

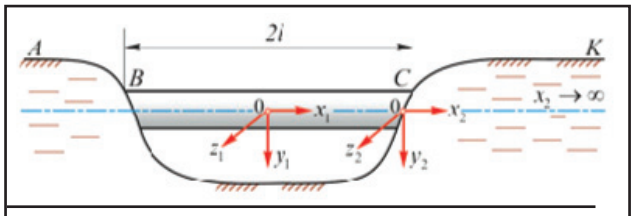

Рис. 1. Схема надземного переходу нафтопроводу

На ділянці *CK*, де нафтопровід знаходиться у ґрунті, його напружено-деформований стан моделюватимемо півбезмежним трубчатим стрижнем, який опирається на пружну основу із двосторонніми зв'язками (модель Фуса–Вінклера).

Поведінку надземної ділянки нафтопроводу *BC* зобразимо прямим поперечним згином трубчатого стрижня скінченної довжини [14]. Силовий вплив на споруду власної ваги нафтопроводу, ваги продукту в трубах, а також ваги ґрунту на підземній ділянці моделюємо рівномірно розподіленими навантаженнями з інтенсивностями q_1 (надземна ділянка) та q_2 (підземна ділянка). Врахуємо також напруження від внутрішнього тиску та сталого за довжиною температурного перепаду.

Запишемо систему диференціальних рівнянь рівноваги в переміщеннях, які описують деформування ділянок нафтопроводу:

$$EJ_z \frac{d^4 w_{y1}}{dx_1^4} + q_1 = 0, \quad x_1 \in [0,1); \tag{1}$$

$$EJ_z \frac{d^4 w_{y2}}{dx_2^4} + Dk_y w_{y2} = q_2, \quad x_2 \in [0,\infty), \tag{2}$$

де w_{y1} та w_{y2} – поперечні переміщення відповідно надземної та підземної ділянок нафтопроводу; E – модуль Юнга матеріалу труб; J_z – осьовий момент інерції перерізу труб; D – діаметр труб; k_y – коефіцієнт постелі ґрунтової основи.

Розв'язок крайової задачі

Зінтегрувавши систему рівнянь (1), (2) та задовольнивши усі необхідні крайові умови, одержали вирази для функції прогину нафтопроводу та її похідних [15].

Вирази внутрішніх зусиль у надземній ділянці нафтопроводу $x_1 \in [0, l)$ мають такий вигляд:

$$\begin{cases} EJ_z \dfrac{d^3 w_{y1}}{dx_1^3} = Q_{y1}(x_1) = -q_1 x_1; \\ EJ_z \dfrac{d^2 w_{y1}}{dx_1^2} = M_{z1}(x_1) = M_{01} - \dfrac{1}{2} q_1 x_1^2. \end{cases} \tag{3}$$

Вирази для знаходження переміщень:

$$\begin{cases} \dfrac{dw_{y1}}{dx_1} = \varphi_1(x_1) = \dfrac{M_{01} x_1}{EJ_z} - \dfrac{q_1 x_1^3}{6EJ_z}; \\ w_{y1}(x_1) = w_{01} + \dfrac{M_{01} x_1^2}{2EJ_z} - \dfrac{q_1 x_1^4}{24EJ_z}. \end{cases} \tag{4}$$

Тут $Q_{y1}(x_1)$, $M_{z1}(x_1)$, $\varphi_1(x_1)$, $w_{y1}(x_1)$ – функції поперечних сил, згинальних моментів та кутів повороту і прогинів у надземній ділянці нафтопроводу.

Вирази внутрішніх зусиль $Q_{y2}(x_2)$, $M_{z2}(x_2)$ та переміщень $\varphi_2(x_2)$, $w_{y2}(x_2)$ у підземній ділянці нафтопроводу $x_2 \in [0, \infty)$ запишемо так:

$$\begin{aligned} Q_{y2}(x_2) &= 2\beta M_{02} \eta_4(x_2) - Q_{02} \eta_2(x_2), \\ M_{z2}(x_2) &= -M_{02} \eta_1(x_2) - \frac{Q_{02}}{\beta} \eta_4(x_2); \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(x_2) &= \frac{2\beta^2}{Dk_y} [2\beta M_{02} \eta_3(x_2) + Q_{02} \eta_1(x_2)], \\ w_{y2}(x_2) &= -\frac{2\beta}{Dk_y} [\beta M_{02} \eta_2(x_2) + Q_{02} \eta_3(x_2)] + \frac{q_2}{Dk_y}. \end{aligned} \tag{6}$$

Тут $\beta = \sqrt[4]{k_y D / 4EJ_z}$ – коефіцієнт, який залежить від жорсткості ґрунтової основи на осадку та від жорсткості труб нафтопроводу при згинанні; функції Цімермана:

$$\eta_1(x_2) = e^{-\beta x_2}(\cos \beta x_2 + \sin \beta x_2);$$

$$\eta_2(x_2) = e^{-\beta x_2}(\cos \beta x_2 - \sin \beta x_2);$$

$$\eta_3(x_2) = e^{-\beta x_2} \cos \beta x_2; \ \ \eta_4(x_2) = e^{-\beta x_2} \sin \beta x_2.$$

Необхідні для обчислень статичні M01, Q02 та геометричний w01 початкові параметри:

$$M_{01} = \frac{q_1 l}{\dfrac{l}{EJ_z} + 2\zeta\beta} \left[\frac{l^2}{6EJ_z} + \zeta(1 + \beta l) \right];$$

$$M_{02} = -M_{01} + \frac{1}{2} q_1 l^2, \ \ Q_{02} = q_1 l;$$

$$w_{01} = -\zeta \left(M_{02} + \frac{Q_{02}}{\beta} \right) - \frac{1}{EJ_z} \left(\frac{M_{01} l^2}{2} - \frac{q_1 l^4}{24} \right) + \frac{q_2}{Dk_y},$$

де $\zeta = 2\beta^2 / Dk_y$.

Рис. 2. Надземний перехід нафтопроводу «Дружба» у Карпатах

Отримані розв'язки (3)–(6) у поєднанні з виразами початкових параметрів дають змогу виконувати повний аналіз розподілу зусиль та деформацій у надземному переході нафтопроводу із урахуванням впливу на поведінку споруди властивостей ґрунтової основи.

Визначення механічних характеристик матеріалу труб

Щоб одержати реальні характеристики міцності споруди в стані тривалої експлуатації, застосовано методику визначення межі текучості і межі міцності матеріалу труб у польових умовах за результатами вимірювань твердості портативним електронним динамічним твердоміром ТЭМП–3. Особливістю такого підходу є попереднє тарування шкали твердоміра для конкретної марки сталі за результатами випробувань на розтяг та твердість зразків, виготовлених із тамплетів, які були вирізані під час ремонтних робіт із ділянок діючого трубопроводу [5].

Запропонований підхід застосовано під час визначення меж плинності та міцності надземних переходів нафтопроводу «Дружба–2», споруджених із безшовних труб чеського виробництва (див. рис. 1). Матеріал труб – сталь «Ц» (ТП 208. 1-Ц-056/67) із терміном експлуатації 33 роки. Механічні характеристики матеріалу нових труб (згідно з сертифікатами якості) такі: σ_T – 416 МПа, σ_B – 590 МПа, E – 2,06 · 10^5 МПа – для нових труб; для труб у стані тривалої експлуатації – σ_T – 370 МПа, σ_B – 530 МПа, E – 2,15 · 10^5 МПа (лабораторні випробування на розтяг вирізаних зразків); σ_T – 364 МПа, σ_B – 506 МПа (випробування у польових умовах (прилад ТЭМП-3) [5].

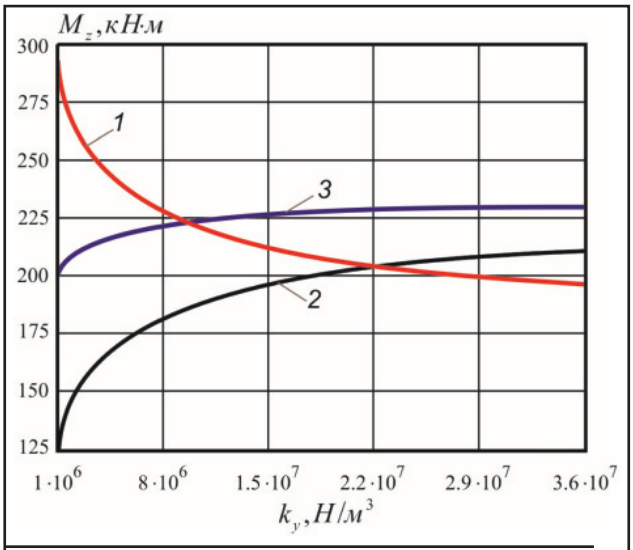

Рис. 3. Залежність згинальних моментів в нафтопроводі від властивостей ґрунтової основи: *1* – згинальний момент посередині надземної ділянки; *2* – згинальний момент на краю підземної ділянки; *3* – максимальний згинальний момент у підземній ділянці

Числовий аналіз отриманих результатів

За приклад було обрано однопрогоновий перехід (на рис. 2 зображено ліворуч). Довжина надземного прогона – 25 м, ґрунтова основа – суглинок зі щебенем, для якої коефіцієнт постелі k_y=10 МН/м^3. Підземні ділянки пе-реходу знаходяться на глибині – 1,2 м, а питома вага ґрунту – 0,027 Н/см^3. Матеріал труб – сталь «Ц» із такими характеристиками: модуль Юнга – 2,15·10^5 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0,3, коефіцієнт лінійного розширення – 12·10^{-6} К$^{-1}$, межа плинності – 364 МПа, діаметр труб – 720 мм, товщина стінки труби – 9,5 мм. Температура повітря під час монтажу переходу становила 22 °С. Трубопроводом транспортують сиру нафту, робочий тиск становить – 3,1 МПа. Інтенсивності розподілених навантажень для розрахункової моделі визначили за стандартними методиками: для заповненого нафтопроводу q_1=5,2 КН/м, q_2=28,5 КН/м; для порожнього нафтопроводу q_1=1,7 КН/м, q_2=25 КН/м.

У результаті числового аналізу виявлено ефект суттєвого перерозподілу зусиль у надземному переході нафтопроводу зі зміною жорсткості його ґрунтової основи. На рис. 3 подано залежність абсолютних значень згинальних моментів у найбільш навантажених поперечних перерізах нафтопроводу від коефіцієнта постелі ґрунтової основи. Зі збільшенням жорсткості основи трубопроводу згинальний момент посередині надземної ділянки поступово зменшується, натомість згинальні моменти в характерних перерізах підземної ділянки зростають. Із подальшим збільшенням коефіцієнта постелі значення згинальних моментів (криві *1* та *2*) поступово наближатимуться до тих, які можна одержати під час використання елементарної «жорсткої» моделі надземного переходу.

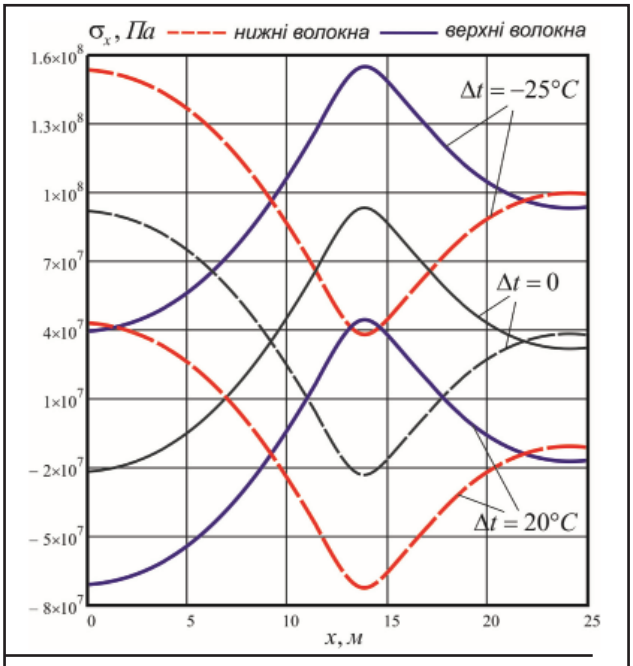

Рис. 4. Осьові напруження у верхніх та нижніх волокнах надземного переходу нафтопроводу

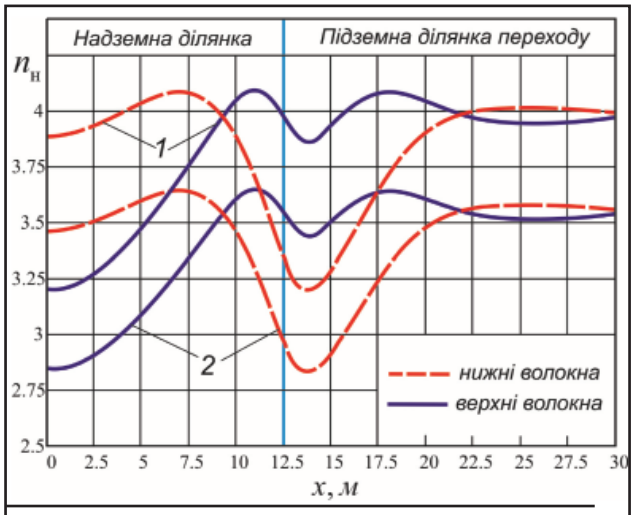

Рис. 5. Оцінка міцності надземного переходу нафтопроводу: *1* – новий перехід, *2* – перехід у стані тривалої експлуатації

Враховуючи двовимірний термопружний стан нафтопроводу, осьове напруження в його крайніх волокнах подамо у такому вигляді:

$$\sigma_x = \mu \frac{pD}{2h} - E\alpha_t \Delta t \pm 4\frac{M_z(x)}{\pi D^2 h},$$

де p – внутрішній тиск у нафтопроводі, μ – коефіцієнт Пуассона, α_t – коефіцієнт лінійного розширення, Δt – температурний перепад.

На рис. 4 подано розподіл осьових напружень у надземному переході нафтопроводу та прилеглій підземній ділянці. На можливий вплив температурних ефектів вказує розташування гілок графіків осьових напружень при Δt=20 °С та Δt=-25 °С порівняно з випадком, коли Δt=0 °С.

Остаточну оцінку міцності переходу нафтопроводу виконуємо за енергетичним критерієм Губера–Мізеса, за яким номінальний коефіцієнт запасу міцності має вигляд

$$n_н = \frac{1}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_x\sigma_\theta}}\sigma_T,$$

де σ_θ – кільцеві напруження від дії внутрішнього тиску.

На рис. 5 подано розподіли номінального коефіцієнта запасу міцності надземного переходу нафтопроводу (при Δt=0). За даних умов навантаження граничний стан нафтопроводу найперше досягається у нижніх стиснутих волокнах на відстані 1,4 м від краю підземної ділянки. За час експлуатації мінімальний коефіцієнт запасу статичної міцності зменшився на 13 %.

Висновки

Розвинуто методику інженерного підходу щодо діагностичної оцінки міцності надземних переходів нафтопроводів, які споруджують у гірських районах. Під час виконання силового аналізу нафтопровід моделювали трубчастим стрижнем, який на прилеглих до надземного переходу ділянках за гіпотезою Фуса-Вінклера контактує з ґрунтовою основою. На завершальному етапі оцінки міцності надземний перехід представили безмоментною оболонкою. Такий підхід дав змогу коректно враховувати вплив на поведінку нафтопроводу властивостей ґрунтової основи і при цьому отримати кінцеві результати у вигляді простих аналітичних виразів. Звернуто увагу на характер перерозподілу зусиль у нафтопроводі зі зміною жорсткості ґрунтової основи. Здійснено оцінку впливу на міцність надземного переходу температурних напружень. Для визначення реальних характеристик міцності матеріалу труб нафтопроводу в стані тривалої експлуатації застосовано удосконалений експрес-метод. Остаточну діагностичну оцінку міцності здійснено за енергетичним критерієм.

Список використаних джерел

1. **Shashi Menon E.** Pipeline planning and construction field manual: Book / E. Shashi Menon. – United States of America, 2011. – P. 577.
2. **Дорошенко Я.В.** Спорудження магістральних трубопроводів: підручник / Я.В. Дорошенко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 563 с.
3. **Бородавкин П.П.** Механика грунтов / П.П. Бородавкин. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2003. – 349 с.
4. **Orynyak I.V.** Analysis of the stress-strain state of an air crossing of pipeline in the course of repair / I.V. Lokhman, M.D. Sidor, S.A. Radchenko // Strength of Materials. – Springer. – 2009. – Volume 41, № 5. – P. 581–591.
5. **Андрусяк А.В.** Порівняльний аналіз механічних характеристик трубної сталі 17ГС у стані постачання та після тривалої експлуатації / А.В. Андрусяк, Б.С. Білобран // II Міжнар. наук.-техн. конф. «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів 11–13 листопада 2010 р.) / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2010. – С. 29–31.
6. **George Antaki A.** Piping and Pipeline Engineering / A. George Antaki. – New York, U.S.A., 2003. – P. 555.
7. **Бородавкин П.П.** Сооружение магистральных трубопроводов: учебн. для вузов / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
8. **Бабин Л.А.** Типовые расчеты по сооружению трубопроводов: учебное пособие / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1999. – 176 с.
9. **Enginering** and Piping Design Guide. Fiberglass Reinforced Piping Systems / National Oilwell Varco, 2010. – P. 33.
10. **Fahad Bakhtyar**, Kenny S. Development of a Fatigue Life Assessment Tool for Pipelines With Local Wrinkling Through Physical Testing and Numerical Modelling // ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Volume 6B: Pipeline and Riser Technology, California, USA, (June 8–13, 2014).
11. **Xiaolin Wang**, Jian Shuai, Yuanxi Ye, Shangzhi Zuo Investigating the Effects of Mining Subsidence on Buried Pipeline Using Finite Element Modeling // International Pipeline Conference, Calgary, September 29–October 3, 2008, Volume 3, pp. 601–606.
12. **Яваров А.В.** Численное моделирование сопротивления массива грунта перемещениям подземного трубопровода / А.В. Яваров // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 3. – С. 360–374.
13. **Алешин В.В.** Численный анализ прочности подземных трубопроводов / В.В. Алешин. – М.: Изд-во Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.
14. **Gere J. M.** Mechanics of materials / J. Gere, B. Goodno. – Stamford: Cengage Learning, 2012. – 620 p.
15. **Андрусяк А.В.** Інженерна оцінка міцності надземного переходу нафтопроводу, спорудженого в гірській місцевості / А.В. Андрусяк, А.С. Величкович // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 1 (54). – С. 89–96.