

## ІНЖЕНЕРНА ОЦІНКА МІЦНОСТІ НАДЗЕМНОГО ПЕРЕХОДУ НАФТОПРОВОДУ, СПОРУДЖЕНОГО В ГІРСЬКІЙ МІСЦЕВОСТІ

А.В. Андрусак, А.С. Величкович

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 507626,  
e-mail: b u d m e s h @ n i n g . e d u . u a

*Викладено результати досліджень, спрямованих на розвиток методології інженерної оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів нафтопроводів, споруджених у гірських районах. З метою здійснення силового аналізу нафтопрвід моделювали трубчастим стрижнем, який на прилеглих до надземного переходу ділянках контактує з ґрунтовою основою за гіпотезою Фусса-Вінклера. На завершальному етапі оцінки міцності надземний перехід схематизували тонкостінною оболонкою. Таке моделювання надземного переходу дозволило враховувати вплив на поведінку нафтопроводу властивостей ґрунтової основи, і при цьому подати остаточні результати у вигляді простих аналітичних виразів, які є зручними для інженерної практики. Для реальної конструкції надземного переходу нафтопроводу "Дружба" на основі одержаних результатів побудовано графіки розподілу зусиль та переміщень вздовж осі споруди. Звернуто увагу на характер перерозподілу зусиль у нафтопроводі при зміні жорсткості ґрунтової основи та на крайові ефекти, які виникають на прилеглих ділянках надземного переходу. Вказано на можливість граничного переходу до результатів розрахунку, які отримують при використанні елементарної "жорсткої" моделі споруди. З урахуванням двовимірного термопружного стану нафтопроводу визначено максимальні осьові напруження, які виникають під час його експлуатації. Остаточну оцінку міцності здійснено за енергетичним критерієм.*

Ключові слова: надземний перехід, трубопровід, пружна основа, напружений стан

*Изложены результаты исследований, направленных на развитие методологии инженерной оценки напруго-деформированного состояния надземных переходов нефтепроводов, сооруженных в горных районах. Для осуществления силового анализа нефтепровод моделировали трубчатым стержнем, который на прилегающих к надземному переходу участках контактирует с грунтовой основой по гипотезе Фусса-Винклера. На завершающем этапе оценки прочности надземный переход схематизировали тонкостенной оболочкой. Такое моделирование надземного перехода позволило учитывать влияние на поведение нефтепровода свойств грунтовой основы, и при этом представить окончательные результаты в виде удобных для инженерной практики простых аналитических выражений. Для реальной конструкции надземного перехода нефтепровода "Дружба" по полученным результатам построены графики распределения усилий и перемещений вдоль оси сооружения. Обращается внимание на характер перераспределения усилий в нефтепроводе при изменении жесткости грунтовой основы и на крайевые эффекты, возникающие на прилегающих участках надземного перехода. Указана возможность предельного перехода к результатам расчета, полученным с использованием элементарной "жесткой" модели сооружения. С учетом двухмерного термопружного состояния нефтепровода определены максимальные осевые напряжения, возникающие при его эксплуатации. Окончательная оценка прочности осуществлена по энергетическому критерию.*

Ключевые слова: надземный переход, трубопровод, упругая основа, напруженное состояние

*The research results, aimed at developing of the methodology for engineering evaluation of the stress-strain state of the overground oil pipeline sections that were built in mountainous areas, are provided. To perform power analysis, the pipeline was modeled with the help of the tubular rod that in accordance with the Fuss-Winkler hypothesis contacted with the ground basis on the sections adjacent to the overground ones. At the final stage of the strength evaluation the overground section was depicted with a thin-wall shell. Such modeling of the overground section allowed to consider the influence of the ground basis properties on the oil pipeline behavior and thus present the final results in the form of simple analytical expressions that are useful for engineering practice. The distributions of forces and displacements along the structure axis were made on the basis of the obtained results for the actual design of the overground section of the "Druzhba" oil pipeline. Attention was paid to the nature of redistribution of forces in the oil pipeline when the ground basis stiffness was changed, as well as to the edge effects that occurred on the sections adjacent to the overground one. The possibility of boundary transition to the calculation results that are obtained with the help of the elementary "rigid" structure model was mentioned. The maximum axial stresses that occur during the oil pipeline operation were determined with the account of its two-dimensional thermoelastic state. The final strength evaluation was carried out in accordance with the energy criterion.*

Keywords: overground section, pipeline, elastic foundation, stress state

**Вступ.** Магістральні нафтопроводи, які споруджуються у гірській місцевості, зазвичай долають на своєму шляху цілу низку природних та штучних перепон (яри, гірські річки, дороги, технологічні виробки, зсуви, паводкові русла тощо). Присутність таких перепон створює необхідність будівництва переходів. Найсуттєвіший вплив на вибір конструкції та спо-

субу будівництва переходу має тип перепони. Найширше застосування в практиці спорудження нафтопроводів у гірських районах одержали балкові переходи. Вони виявились найдешевшими щодо проведення будівельних робіт та простими і зручними в експлуатації [1, 2]. Разом з цим не слід забувати, що переходи магістральних трубопроводів це високоаванта-

жені конструкції, оскільки ще на етапі проектування з метою економії матеріалу в них закладаються досить низькі, порівняно з іншими галузями, коефіцієнти запасу міцності [3]. Тому при проектувальних чи оцінкових розрахунках на міцність та жорсткість слід прагнути урахувати всі суттєві фактори, які впливають на поведінку переходу нафтопроводу під час його експлуатації. Зважаючи на вищевикладене зрозуміло, що розвиток інженерних методів та моделей оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів нафтопроводів є актуальною практичною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню безпеки трубопровідних систем, прокладених у гірських районах.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій.** Актуальність уточнення та розвитку методів розрахунку напружено-деформованого стану магістральних нафтопроводів впродовж настільки довготривалого часу пояснюється тим, що внаслідок великої протяжності трубопроводу збільшення товщини його стінки хоча б на 1 мм призведе до суттєвої перевитрати матеріалу. Для вирішення завдання забезпечення міцності споруди за мінімальних витрат на будівництво необхідно використовувати методи розрахунку, які якнайповніше відображають умови роботи споруди на стадіях будівництва та експлуатації.

Характерною особливістю роботи надземного трубопровідного переходу, як стержневої конструкції, є його взаємодія з прилеглими підземними ділянками. Зазвичай, надземні балкові переходи магістральних трубопроводів не мають жорсткого закріплення, а опираються на ґрунтову основу (дно траншеї). Массив ґрунту для них є не лише навантаженням, але і середовищем, в якому розвиваються деформації споруди. Як результат, завдання розрахунку напружено-деформованого стану трубопроводу переходить в завдання розрахунку системи “трубопровід – массив ґрунту”. Результати робіт [4, 5] вказують на те, що при невеликих поперечних переміщеннях підземного трубопроводу на суміжних з надземним переходом підземних ділянках їх можна вважати півнескінченими балками на пружній основі.

Щодо моделювання пружної основи в розрахункових моделях трубопровідних систем можна виділити такі основні напрями. Массив ґрунту задається лінійними або нелінійними в'язями скінченної жорсткості. В'язі встановлюються в кожному вузлі схеми трубопроводу у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Основна проблема використання таких в'язей – це визначення функцій опору ґрунту [6]. Моделі суцільного середовища масиву ґрунту у зв'язку з очевидністю нелінійних властивостей ґрунту використовують нелінійні співвідношення між напруженнями і деформаціями, і можуть враховувати зміцнення, як при ущільненні, так і при формозміні ґрунту [7–9]. Альтернативою моделі суцільного середовища в задачах розрахунку системи “трубопровід – массив ґрунту” може стати дискретне середови-

ще і метод дискретних елементів. Теоретичні основи цього методу викладені в роботі [10]. Інженерні методи схематизації масиву ґрунту в розрахункових моделях трубопровідних систем викладені зокрема в роботах [5, 11, 12]. У основі інженерних методів лежить введення напів-емпіричних виразів, які дозволяють якісно та кількісно оцінювати опір масиву ґрунту.

При моделюванні трубопроводу залежно від ситуаційності конкретної задачі його задають стержнем, ниткою, оболонкою чи суцільним середовищем. Розрахунковий апарат щодо таких об'єктів дослідження добре розвинутий в класичних розділах механіки деформівного твердого тіла [13, 14].

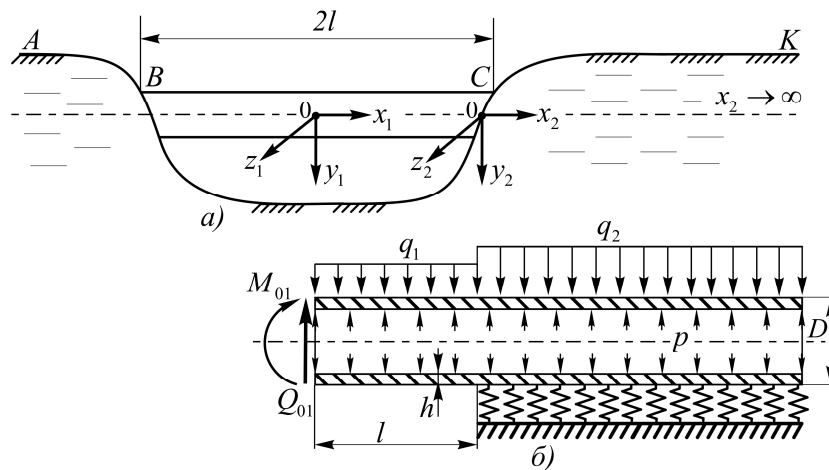
**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Аналіз відомих підручників за якими здійснюють підготовку фахівців трубопровідної справи вказує на те, що при інженерному розрахунку надземних балкових переходів пропонується надмірна схематизація роботи об'єкту дослідження. Розрахункову модель надземного переходу представляють у вигляді жорстко закріпленої з обидвох боків балки [1, 15, 16]. Зрозуміло, що такий підхід суттєво спрощує задачу, але разом із цим за певних обставин може призводити до суттєвих похибок розрахунку, оскільки використана модель не дозволяє жодним чином врахувати вплив на міцність переходу властивостей ґрунтової основи, на яку опирається трубопровід.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є розвиток методології інженерного розрахунку надземного переходу нафтопроводу. Застосований авторами підхід до розрахунку дасть можливість урахувувати вплив на міцність споруди властивостей ґрунтової основи, при цьому будуть одержані прості аналітичні результати, придатні для інженерної практики.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо схему однопрогонового надземного переходу нафтопроводу рис. 1, а. Перехід складається з надземної ділянки  $BC$  завдовжки  $2l$  та прилеглих до неї підземних ділянок  $AB$  та  $CK$ , які опираються на ґрунтову основу. Довжини підземних ділянок значно більші за надземну ділянку. Зважаючи на те, що властивості ґрунту на підземних ділянках ідентичні, а надземна ділянка деформується симетрично відносно своєї середини, достатньо описати напружено-деформований стан нафтопроводу на половині ділянки  $BC$  та ділянці  $CK$ .

Уведемо локальні системи декартових координат (рис. 1, а), сумістивши їх початки відповідно із серединою надземної ділянки  $BC$  та із лівим краєм підземної ділянки  $CK$ .

На ділянці  $CK$ , де нафтопровід знаходиться у ґрунті, його напружено-деформований стан моделюватимемо півбезмежним трубчатим стержнем, який опирається на пружну основу із двосторонніми зв'язками (рис. 1, б). Використаємо модель пружної основи Фусса-Вінклера. Для такої основи розподілена реакція в кожній



а – загальний вигляд об'єкта дослідження; б – розрахункова модель

Рисунок 1 – Схема надземного переходу нафтопроводу

точці труби пропорційна прогину нафтопроводу, а також залежить від властивостей ґрунту. Поведінку надземної ділянки нафтопроводу BC зобразимо прямим поперечним згином трубчатого стержня скінченної довжини. Силовий вплив на споруду власної ваги нафтопроводу, ваги продукту в трубах, а також ваги ґрунту на підземній ділянці моделюємо рівномірно розподіленими навантаженнями з інтенсивностями  $q_1$  та  $q_2$ . Також врахуємо напруження від внутрішнього тиску та сталого за довжиною температурного перепаду. Зазначимо, що після завершення силового та деформаційного аналізу поведінки споруди і переході до більш детального розгляду питань міцності, нафтопровід моделюватимемо тонкостінною оболонкою. Усі дослідження проводимо в геометрично та фізично лінійній постановці.

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

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

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

де  $w_{y1}$ ,  $w_{y2}$  – поперечні переміщення відповідно надземної та підземної ділянок нафтопроводу;

$E$  – модуль Юнга матеріалу труб;

$J_z$  – осьовий момент інерції попереччя труб;

$D$  – діаметр труб;

$k_y$  – коефіцієнт постелі ґрунтової основи.

Послідовне інтегрування чотири рази рівняння (1) дозволяє одержати вирази для функції прогину і її похідних. Загальні вирази внутрішніх зусиль в надземній ділянці нафтопроводу матимуть такий вигляд:

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

Вирази для знаходження переміщень:

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

Тут  $Q_{y1}(x_1)$ ,  $M_{z1}(x_1)$ ,  $\varphi_1(x_1)$  – функції поперечних сил, згинальних моментів та кутів повороту в надземній ділянці нафтопроводу;  $Q_{01}$ ,  $M_{01}$  та  $\varphi_{01}$ ,  $w_{01}$  – статичні та геометричні початкові параметри.

Тепер перейдемо до побудови загального розв'язку рівняння (2). Оскільки для нашої споруди  $EJ_z = const$ , то рівняння (2) подамо в такому виді

$$\frac{d^4 w_{y2}}{dx_2^4} + 4\beta^4 w_{y2} = \frac{q_2}{EJ_z}, \quad x_2 \in [0, \infty), \quad (5)$$

де введено позначення  $\beta = \sqrt[4]{k_y D / 4EJ_z}$  – коефіцієнт, який залежить від жорсткості ґрунтової основи на осадку і від жорсткості труб нафтопроводу на згин.

Загальний інтеграл рівняння (5) представимо у такому вигляді

$$\begin{aligned} w_{y2}(x_2) = e^{-\beta x_2} (C_1 \sin \beta x_2 + C_2 \cos \beta x_2) + \\ + e^{\beta x_2} (C_3 \sin \beta x_2 + C_4 \cos \beta x_2) + \frac{q_2}{Dk_y}, \end{aligned} \quad (6)$$

де сталі інтегрування  $C_1 - C_4$  визначаються з граничних умов на краях підземної ділянки. Виконуючи послідовно операції диференціювання, одержуємо загальні вирази для визначення кутів повороту  $\varphi_2(x_2)$ , згинальних моментів  $M_{z2}(x_2)$  та поперечних сил  $Q_{y2}(x_2)$ , які виникають у підземній ділянці нафтопроводу:

$$\frac{dw_{y2}}{dx_2} = \varphi_2(x_2) = \beta e^{-\beta x_2} [C_1(-\sin \beta x_2 + \cos \beta x_2) + C_2(-\cos \beta x_2 - \sin \beta x_2)] + \beta e^{\beta x_2} [C_3(\sin \beta x_2 + \cos \beta x_2) + C_4(\cos \beta x_2 - \sin \beta x_2)]; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 w_{y2}}{dx_2^2} = M_2(x_2) = 2\beta^2 e^{-\beta x_2} (-C_1 \cos \beta x_2 + C_2 \sin \beta x_2) + 2\beta^2 e^{\beta x_2} (C_3 \cos \beta x_2 - C_4 \sin \beta x_2); \quad (8)$$

$$\frac{d^3 w_{y2}}{dx_2^3} = Q_2(x_2) = 2\beta^3 e^{-\beta x_2} [C_1(\cos \beta x_2 + \sin \beta x_2) + C_2(-\sin \beta x_2 + \cos \beta x_2)] + 2\beta^3 e^{\beta x_2} [C_3(\cos \beta x_2 - \sin \beta x_2) + C_4(-\sin \beta x_2 - \cos \beta x_2)]. \quad (9)$$

Для знаходження сталих інтегрування сформулюємо чотири крайові умови. Перші дві умови описують те, що на правому краю підземної ділянки нафтопроводу  $CK$  поперечна сила і згинальний момент дорівнюють нулю:

$$EJ_z \frac{d^3 w_{y2}}{dx_2^3} \Big|_{x_2 \rightarrow \infty} = 0, EJ_z \frac{d^2 w_{y2}}{dx_2^2} \Big|_{x_2 \rightarrow \infty} = 0. \quad (10)$$

Тоді, задовольняючи умови (10) з виразів (8) та (9), отримаємо  $C_3 = C_4 = 0$ . Такий самий результат можна здобути, аналізуючи розв'язок (6). Якщо  $x_2 \rightarrow \infty$ , то у виразі (6) множник  $e^{\beta x_2} \rightarrow \infty$ , а це суперечить фізичному змісту поставленої задачі. Щоб позбутися такої суперечності необхідно сталі інтегрування  $C_3$  та  $C_4$  прийняти рівними нулю.

Наступні дві умови описують те, що на лівому краю підземної ділянки, друга та третя похідні від функції поперечних переміщень дорівнюють статичним початковим параметрам ділянки  $CK$ :

$$EJ_z \frac{d^2 w_{y2}}{dx_2^2} \Big|_{x_2 \rightarrow 0} = M_{02}, \quad EJ_z \frac{d^3 w_{y2}}{dx_2^3} \Big|_{x_2 \rightarrow 0} = Q_{02}. \quad (11)$$

Таке представлення крайових умов – це методичний крок, який дозволить подати співвідношення (6) – (9) у простому компактному вигляді. Задовольняючи умови (11) з виразів (8) та (9), одержимо:

$$C_1 = -\frac{M_{02}}{EJ_z 2\beta^2}, C_2 = \frac{\beta M_{02} + Q_{02}}{2\beta^3 EJ_z}. \quad (12)$$

Тепер, підставляючи значення сталих інтегрування (12) у вираз (6) та враховуючи співвідношення (7) – (9), отримаємо повний розв'язок рівняння (5) для підземної ділянки у вигляді формул для визначення поперечних сил  $Q_{y2}(x_2)$ , згинальних моментів  $M_{z2}(x_2)$ , кутів поворотів  $\varphi_2(x_2)$  та поперечних переміщень  $w_{y2}(x_2)$ :

$$Q_{y2}(x_2) = 2\beta M_{02} \eta_4(x_2) - Q_{02} \eta_2(x_2), \quad M_{z2}(x_2) = -M_{02} \eta_1(x_2) - \frac{Q_{02}}{\beta} \eta_4(x_2); \quad (13)$$

$$\varphi_2(x_2) = \frac{2\beta^2}{Dk_y} [2\beta M_{02} \eta_3(x_2) + Q_{02} \eta_1(x_2)], \quad (14)$$

$$w_{y2}(x_2) = -\frac{2\beta}{Dk_y} [\beta M_{02} \eta_2(x_2) + Q_{02} \eta_3(x_2)] + \frac{q_2}{Dk_y}$$

У формулах (13), (14) введено нові позначення:

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

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

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

Залишилось записати крайові умови на початку надземної ділянки нафтопроводу і умови сумісності і нерозривності у місці з'єднання надземної ділянки  $BC$  із підземною ділянкою  $CK$ . Отже, при  $x_1 = 0$  з умов симетрії споруди зрозуміло, що дотична до лінії прогинів буде паралельною осі  $x_1$ , тому  $\varphi_{01} = 0$  та  $Q_{01} = 0$ . У місці з'єднання ділянок маємо таку систему умов:

$$Q_{y1}(l) = Q_{y2}(0), \quad M_{z1}(l) = M_{z2}(0); \quad \varphi_{y1}(l) = \varphi_{y2}(0), \quad w_{y1}(l) = w_{y2}(0). \quad (15)$$

Задовольняючи умови (15), із співвідношень (3), (4) та (13), (14), отримаємо вирази для знаходження початкових параметрів:

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

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

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

де  $\zeta = 2\beta^2 / Dk_y$ .

Отримані розв'язки (3), (4) та (13), (14), у поєднанні з виразами початкових параметрів, дозволяють виконувати повний аналіз розподілу зусиль та деформацій в надземному переході нафтопроводу із врахуванням впливу на поведінку споруди властивостей ґрунтової основи.



*а – однопрогоновий перехід; б – перехід з проміжною опорою*

**Рисунок 2 – Надземний перехід нафтопроводу Дружба в Карпатах**

Слід зауважити, що загальний розв'язок рівняння (5), можна представити і в дещо іншому вигляді, якщо скористатись фундаментальними функціями (функціями Крилова). Ми аналізували і такий шлях побудови розв'язку. Зокрема такий підхід до розв'язку ключового рівняння (5) застосовують деякі автори при розрахунках підземних трубопровідних систем [5]. Головною перевагою застосування нормальних фундаментальних функцій є те, що довільні сталі інтегрування одразу матимуть конкретний фізичний зміст. Однак для нашої задачі переваги використання функцій Крилова нівелюються. Так, для півбезмежного стержня зі зростанням добутку  $\beta x_i$  функції також зростатимуть, зрештою результат стає залежним від малих різниць великих чисел, а це призводить до суттєвої втрати точності обчислень.

Проілюструємо одержані результати на прикладі реальної задачі. На рис. 2 зображено загальний вигляд надземного переходу нафтопроводу, який прокладено у гірській місцевості (за приклад ми обрали однопрогоновий перехід).

Довжина надземного прогону переходу складає 25 м, ґрунтова основа – суглинок зі щебенем, для якої коефіцієнт постелі  $k_y = 10 \text{ МН} / \text{м}^3$ . Підземні ділянки переходу знаходяться на глибині  $-1,2 \text{ м}$ , а питома вага ґрунту –  $0,027 \text{ Н} / \text{см}^3$ . Матеріал труб – сталь «Ц» (виробництва ЧСР) з такими характеристиками: модуль Юнга –  $2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ , коефіцієнт Пуассона – 0,3, коефіцієнт лінійного розширення –  $12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ , межа плинності –

$364 \text{ МПа}$ , діаметр труб – 720 мм, товщина стінки труби – 9,5 мм. Температура повітря під час монтажу переходу складала  $22^\circ \text{ С}$ . Трубопроводом транспортують сиру нафту, робочий тиск становить –  $3,1 \text{ МПа}$ . Інтенсивності розподілених навантажень для розрахункової моделі (рис. 1, б) обчислювали за стандартними методиками [17]. Їх значення виявились наступними: для заповненого продуктом нафтопроводу  $q_1 = 5,2 \text{ КН} / \text{м}$ ,  $q_2 = 28,5 \text{ КН} / \text{м}$ ; для порожнього нафтопроводу  $q_1 = 1,7 \text{ КН} / \text{м}$ ,  $q_2 = 25 \text{ КН} / \text{м}$ .

На рис. 3 та рис. 4 подано розподіл внутрішніх зусиль за довжиною характерних ділянок нафтопроводу (графіки представляємо в стаціонарній системі декартових координат, початок якої суміщено із серединою надземної ділянки). Такі графічні залежності опосередковано описують напружений стан споруди. Поперечна сила набуває найбільшого абсолютного значення  $65 \text{ КН}$  на межі з'єднання надземної та підземної ділянок, а на середині надземної ділянки переходу дорівнює нулеві. Ще один суттєвий пік значень поперечних сил спостерігається уже у підземній ділянці, він становить  $58 \text{ КН}$  і виникає на відстані 3 м від краю ділянки. Зрозуміло, що у перерізах з піковими значеннями поперечних сил не бажано розміщувати зварні чи будь-які інші з'єднання нафтопроводу. Щодо розподілу згинальних моментів вздовж ділянок нафтопроводу, можна виділити два небезпечних попереччя. На середині надземної ділянки виникає згинальний момент  $220,9 \text{ КНм}$ , який викликає стискаючі нормаль-

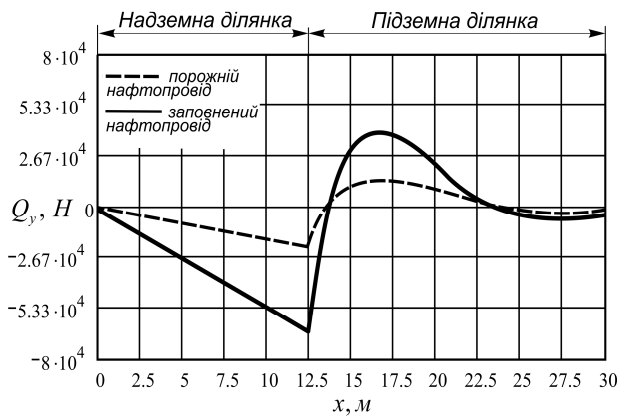


Рис. 3 – Розподіл поперечних сил в нафтопроводі

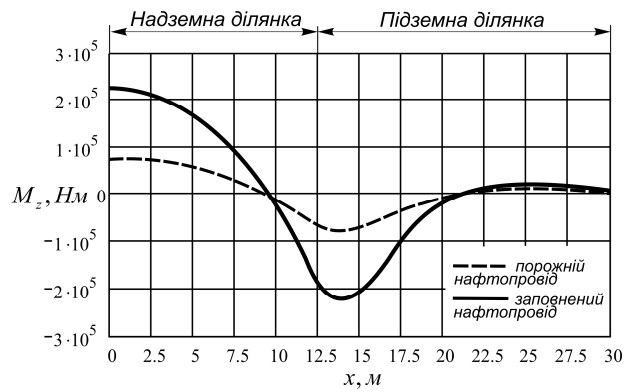


Рис. 4 – Розподіл згинальних моментів в нафтопроводі

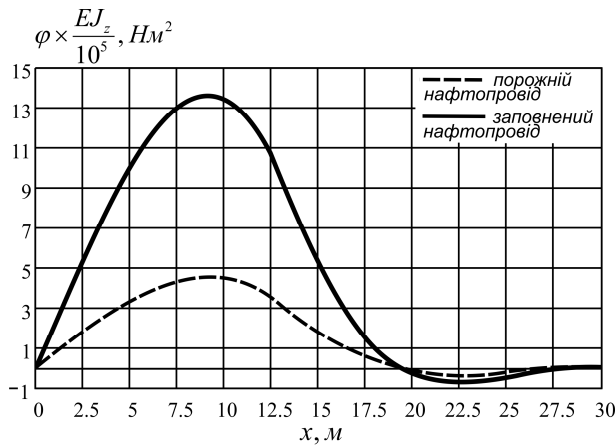


Рис. 5 – Кути повороту перерізів нафтопроводу

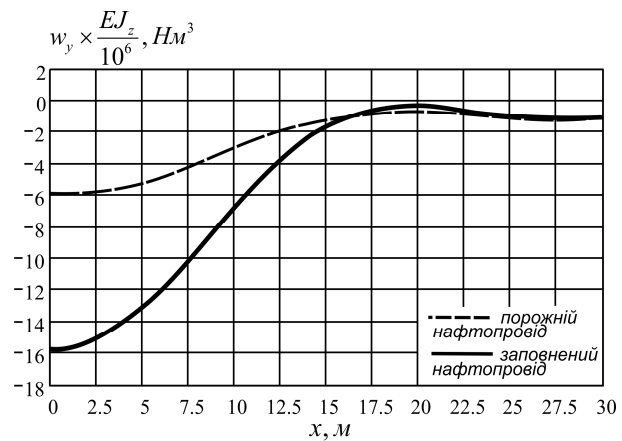


Рис. 6 – Поперечні переміщення нафтопроводу

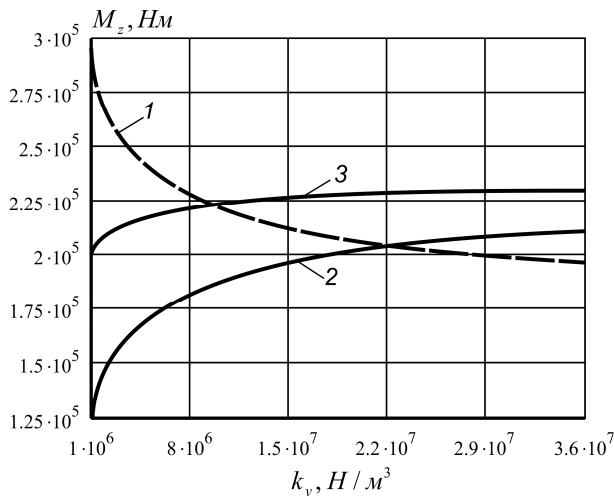
ні напруження у верхніх волокнах труб. Максимальний за модулем згинальний момент – 232 КНм діє на відстані 1,4 м від краю підземної ділянки і викликає стискаючі нормальні напруження у нижніх волокнах труб. Максимальні значення внутрішніх зусиль в заповненому продуктом нафтопроводі в середньому на 67% більші, ніж в порожньому.

На рис. 5 та рис. 6 подано розподіл переміщень за довжиною характерних ділянок нафтопроводу. Такі графічні залежності повністю описують процес деформування розглянутої частини споруди. Основний екстремум функції поперечних переміщень знаходиться над центром надземного переходу. Похідна від цієї функції – кут нахилу осі труби над центром переходу дорівнює нулю. На початку підземної ділянки нафтопровід трохи припіднімається у ґрунті, а другий локальний екстремум поперечних переміщень виникає на відстані 7,5 м від початку підземної ділянки. Загалом більш детальне аналізування прогинів свідчить, що залежно від жорсткості основи, функція  $w_y(x)$  може мати одне або три екстремальних значення. Характерною особливістю представлених залежностей (рис. 3 – рис. 6) є хвилоподібні зміни функцій зусиль та переміщень на початку підземної ділянки нафтопроводу із поступовим

загасанням з віддаленням від краю цієї ділянки. Такий ефект можемо назвати крайовим ефектом змін напруженого стану підземної ділянки переходу, а довжину на якій цей ефект суттєво проявляється – довжиною крайового ефекту. Загасання ефекту пояснюється наявністю у виразах (13), (14) функцій  $\eta_i$ , які містять множник  $e^{-\beta x_2}$ . Цей множник прямує до нуля, якщо добуток  $\beta x_2$  прямує до нескінченності. Можемо оцінити довжину крайового ефекту для нашої задачі, скориставшись функцією  $f(\beta x_2) = e^{-\beta x_2}$ . Якщо  $x_2 = 0$ , то ця функція дорівнює одиниці. Якщо  $\beta x_2 = \pi$ , то  $f(\pi) = 0,046$ ; тобто з точністю до 5% можна вважати функцію такою, що загасає. З рівності  $\beta L = \pi$  обчислюємо, що для підземної ділянки переходу нафтопроводу крайовий ефект матиме суттєві прояви на довжині 11,2 м.

Зазначимо, що деформування трубопроводу і його напружений стан залежать від фізико-механічних властивостей ґрунтової основи переходу. Властивості основи для укладання труб переходу відрізняються залежно від місцевості, глибини траншеї тощо. Зауважимо, що опір переміщенням труби навіть одного типу ґрунту може значно відрізнятися залежно від сезону чи

погодних умов [11]. На рис. 7 подано залежність абсолютних значень згинальних моментів в найбільш навантажених поперечних перерізах нафтопроводу від коефіцієнту постелі ґрунтової основи. Бачимо, що зі збільшенням жорсткості основи трубопроводу – згинальний момент посередині надземної ділянки поступово зменшується, натомість згинальні моменти в характерних перерізах підземної ділянки зростають. Чим жорсткішою стає ґрунтова основа, тим ближче до краю підземної ділянки розташовується переріз, в якому діє максимальний згинальний момент. При подальшому збільшенні коефіцієнту постелі значення згинальних моментів (криві 1 та 2) поступово наближатимуться до тих, які можна одержати при використанні елементарної “жорсткої” моделі надземного переходу.



1 – згинальний момент посередині надземної ділянки; 2 – згинальний момент на краю підземної ділянки; 3 – максимальний згинальний момент у підземній ділянці

**Рисунок 7 – Залежність згинальних моментів в нафтопроводі від властивостей ґрунтової основи**

Переходимо до завершального етапу оцінки міцності надземного переходу нафтопроводу. Враховуючи двовимірний термопружний стан нафтопроводу осьове напруження в його крайніх волокнах подамо у такому вигляді

$$\sigma_x = \mu\sigma_\theta \pm \sigma_T \pm \sigma_{M_z},$$

де  $\sigma_\theta$  – кільцеві напруження від дії внутрішнього тиску;

$\sigma_T$  – температурні напруження;

$\sigma_{M_z}$  – нормальні напруження, спричинені згином;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона. Деталізуємо останній вираз

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

тут  $p$  – внутрішній тиск в нафтопроводі;

$\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного розширення;

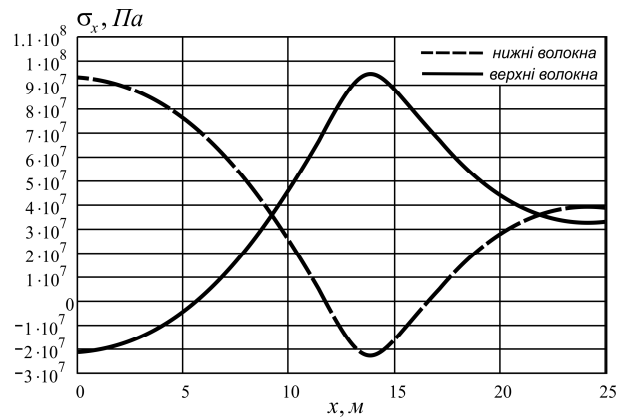
$\Delta t$  – температурний перепад.

Знехтуємо дотичними напруженнями від поперечних сил порівняно з нормальними напруженнями від згинального моменту. Матеріал нафтопроводу перебуває у плоскому напруженому стані з головними напруженнями  $\sigma_x$  та  $\sigma_\theta$ . Сформулюємо умову міцності нафтопроводу як тонкостінної оболонки. Skorистась енергетичним критерієм Губера-Мізеса, згідно із яким еквівалентні напруження визначатимемо за таким виразом

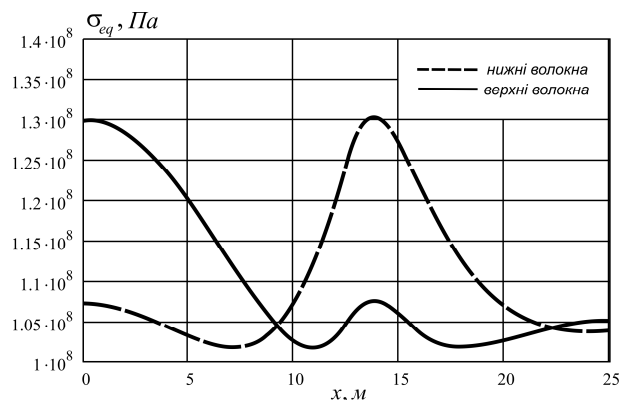
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_\theta^2} - \sigma_x \sigma_\theta.$$

Для забезпечення міцності споруди необхідно щоб виконувалась умова  $\sigma_{eq} \leq [\sigma]$ , де  $[\sigma]$  – допустиме напруження для матеріалу споруди з урахуванням коефіцієнтів запасу, умов роботи, надійності тощо.

На рис. 8 та рис. 9 подано розподіл осьових та еквівалентних напружень в надземному переході нафтопроводу та прилеглий підземній ділянці. Залежності побудовані для випадку, коли температурний перепад відсутній. За даних умов навантаження граничний стан нафтопроводу найперше досягається в нижніх стиснутих волокнах на відстані 1,4 м від краю підземної ділянки.



**Рисунок 8 – Осьові напруження у верхніх та нижніх волокнах надземного переходу нафтопроводу**



**Рисунок 9 – Еквівалентні напруження у верхніх та нижніх волокнах надземного переходу нафтопроводу**

Висновки

Розвинуто методологію інженерного підходу щодо оцінки напружено-деформованого стану надземних переходів нафтопроводів, які споруджують в гірських районах. При виконанні силового аналізу нафтопрвід моделювали трубчастим стержнем, який на прилеглих до надземного переходу ділянках контактує з ґрунтовою основою за гіпотезою Фусса-Вінклера. На завершальному етапі оцінки міцності надземний перехід представили безмоментною оболонкою. Такий підхід на етапі моделювання споруди дозволив коректно враховувати вплив на поведінку нафтопроводу властивостей ґрунтової основи, і при цьому отримати кінцеві результати у вигляді простих аналітичних виразів, які є придатними для інженерної практики. Запропоновані методичні підходи реалізували при оцінці міцності реальної конструкції надземного переходу нафтопроводу "Дружба". Звернуто увагу на характер перерозподілу зусиль у нафтопроводі при зміні жорсткості ґрунтової основи та на крайові ефекти, які виникають на прилеглих ділянках надземного переходу. З урахуванням двовимірного термопружного стану нафтопроводу визначено максимальні осьові напруження, які виникають при його експлуатації. Остаточну оцінку міцності здійснено за енергетичним критерієм.

Завданнями наступних етапів досліджень автори бачать спробу уточнення оцінки температурних напружень в надземних переходах трубопроводів та розвиток інженерних підходів розрахунку таких переходів на сейсмостійкість.

Література

1 Бородавкін П. П. Сооружение магистральных трубопроводов: Учебник для вузов / П. П. Бородавкін, В. Л. Березин. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 471 с.  
2 Shashi Menon E. Pipeline planning and construction field manual: Book / E. Shashi Menon. – United States of America, 2011. – p. 577.  
3 Ориняк І. В. Визначення напружено – деформованого стану повітряного переходу трубопроводу при виконанні ремонтних робіт / І. В. Ориняк, І. В. Лохман, М. Д. Сидор, С. А. Радченко, М. В. Бородій // Проблеми прочності. – 2009. – №5(401). – С. 169 – 181.  
4 Білобран Б.С. Розрахунок напружено-деформованого стану балкових переходів магистральних трубопроводів чисельними методами / Б.С. Білобран, А.Р. Дзюбик // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2007. – Вип. 588. – С. 8 – 13.  
5 Айнбиндер А. Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость: Справочное пособие / А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн. – М.: Недра, 1982. – 341 с.

6 Яваров А. В. Численное моделирование сопротивления массива грунта перемещениям подземного трубопровода / А.В. Яваров // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". – 2012. – №3. – С. 360 – 374.

7 Benz T. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences / T. Benz // Mitteilungen des Instituts für Geotechnik Universität Stuttgart. – 2007. – Vol. – 55. p. 209.

8 Алешин В. В. Численный анализ прочности подземных трубопроводов / В. В. Алешин. – М.: Изд-во Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.

9 Селезнев В. Е. Математическое моделирование магистральных трубопроводных систем. Дополнительные главы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: Изд-во МАКС Пресс, 2009. – 356 с.

10 Williams J.R. Discrete Element Simulation and the Contact Problem / J.R. Williams, R. O'Connor // Archives of Computational Methods in Engineering. – 1999. – Vol. – 64. p. 279 – 304.

11 Бородавкін П. П. Механика ґрунтів / П.П. Бородавкін. – М.: Недра – Бизнесцентр, 2003. – 349 с.

12 Honegger D. G. Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon / D. G.Honegger, J. Nyman // Pipelines Pipeline Research Council. – 2004. – p. 7.

13 Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применение / Х.Хан. – М.: Мир, 1988. – 344 с.

14 Gere J. M. Mechanics of materials / J. Gere, В. Goodno. – Stamford: Cengage Learning, 2012. – 620 p.

15 Дорошенко Я.В. Спорудження магистральних трубопроводів: Підручник / Я.В. Дорошенко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 563 с.

16 Бабин Л.А. Типовые расчеты по сооружению трубопроводов: Учебное пособие / Л.А. Бабин, Л.И. Быков, В.Я. Волохов. – М.: Недра, 1979. – 176 с.

17 Рудаченко А.В. Исследования напряженно – деформированного состояния трубопроводов: Учебное пособие / А.В. Рудаченко, А.Л. Саруев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
18.02.15

Рекомендована до друку  
професором **Векериком В.І.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. фіз.-мат. наук **Соловком Я.Т.**  
(Івано-Франківський університет права імені  
короля Данила Галицького, м. Івано-Франківськ)