

Дослідження та методи аналізу

УДК 621.643.002:622.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2021-3(80)-36-45

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВОДІВ У ВИПАДКАХ ЇХ НЕСИМЕТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДІЛЯНКАХ НАДЗЕМНИХ ПЕРЕХОДІВ

О. Ю. Коробков, Є. Й. Ріпецький, Р. Й. Ріпецький

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: olehkorobkov@gmail.com

Узагальнено результати геодезичних обстежень ряду ділянок надземних переходів трубопроводів різного призначення при дослідженні напружено-деформованого стану (НДС). Показано, що для трубопроводів є характерним процес несиметричного навантаження, який проявляється у зміщенні максимальної стріли прогину відносно середини прольоту. Запропоновано методичні підходи щодо оцінки НДС трубопроводів у випадках його несиметричного навантаження на ділянках надземних переходів. Розглянуто можливість використання величини мінімального радіуса кривизни трубопроводу як критерію оцінки НДС. У першому наближенні зігнуту вісь трубопроводу апроксимовано дугою кола, і на основі геометричної подібності отримано розрахункову формулу радіуса кривизни. Формулу поширено на всі випадки несиметричного навантаження шляхом введення безрозмірної функції $\psi(k)$ в залежності від коефіцієнта несиметричності k . Дану функцію $\psi(k)$ було отримано з використанням теорії зігнутої осі балки, яка навантажена зосередженою силою P . Проаналізовано, що при симетричному навантаженні існуючі підходи до апроксимації осі трубопроводу дугою кола дають занижені результати в оцінці НДС на 34%, а при несиметричному навантаженні ця розбіжність збільшується до 46%. Підтверджено узгодженість теоретичних результатів мінімального радіуса кривизни з експериментальними даними. Запропонована методика орієнтована на практичне застосування опрацювання даних геодезичних вимірів, оскільки включає параметри, які доступні для контролю НДС геодезичними приладами.

Ключові слова: трубопровід, надземний перехід, геометрична подібність, дискретні координати, напружено-деформований стан.

Обобщены результаты геодезических обследований ряда участков надземных переходов трубопроводов различного назначения при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС). Показано, что для трубопроводов характерен процесс несимметрической нагрузки, который проявляется в смещении максимальной стрелы прогиба относительно середины пролета. Предложены методические подходы к оценке НДС трубопроводов в случаях их несимметричной нагрузки на участках надземных переходов. Рассмотрена возможность использовать величину минимального радиуса кривизны трубопровода в качестве критерия оценки НДС. В первом приближении изогнутая ось трубопровода аппроксимирована дугой окружности и на основе геометрического подобия получена расчетная формула радиуса кривизны. Формула распространена на все случаи несимметричной нагрузки путем введения безразмерной функции $\psi(k)$ в зависимости от коэффициента несимметричности k . Данная функция $\psi(k)$ получена с использованием теории изогнутой оси балки, нагружена сосредоточенной силой P . Проанализировано, что в случаях симметричной

нагрузки существующие подходы к аппроксимации оси трубопровода дугой окружности дают заниженные на 34% результаты в оценке НДС, а при несимметричной нагрузке это расхождение увеличивается до 46%. Подтверждена согласованность теоретических результатов минимального радиуса кривизны с экспериментальными данными. Предложенная методика ориентирована на практическое применение обработки данных геодезических измерений, так как включает параметры доступные для контроля НДС геодезическими приборами.

Ключевые слова: трубопровод, надземный переход, геометрическое подобие, дискретные координаты, напряженно-деформированное состояние.

The geodetic surveys results of a number of above-ground pipeline crossings for various purposes in the study of stress-deformed state (SDS) are summarized. It is shown that pipelines are characterized by the process of asymmetric loading, which is manifested in the displacement of the maximum deflection arrow relative to the middle of the span. Methodical approaches to estimation of SDS of pipelines in cases of its asymmetric loading on sections of overpasses are offered. The minimum radius of curvature of the pipeline was chosen as the criterion for SDS assessment. In the first approximation, the curved axis of the pipeline is approximated by an arc of a circle and on the basis of geometric similarity the calculated formula of radius of curvature is obtained. The formula is extended to all cases of asymmetric loading by introducing the dimensionless function $\psi(k)$ depending on the asymmetry coefficient k . This function $\psi(k)$ is obtained using the theory of the curved axis of the beam, which is loaded by a concentrated force P , and approximated by a linear dependence. It is analyzed that at symmetrical loading the existing approaches to approximation of the axis of the pipeline by an arc of a circle give the underestimated result in an estimation of the SDS by 34%, and at asymmetric loading this discrepancy increases to 46%. The practical convergence of the results of the minimum radius of curvature with the experimental data is confirmed. The proposed technique is focused on the practical application of the processing of geodetic measurements, as it includes the parameters available for SDS control by geodetic instruments.

Keywords: pipelines, above-ground pipeline crossings, geometric similarity, discrete coordinates, stress-deformed state.

Вступ

Трубопроводи як лінійні та протяжні інженерні об'єкти характеризується значною кількістю надземних переходів через різні природні та штучні перешкоди. Як правило, на ділянці надземного переходу трубопровід утворює прольотну конструкцію, яка складається з опор та додаткових кріплень, що підтримують трубопровід у підвищеному стані. В усіх прольотних конструкціях трубопроводи схильні до деформацій, які проявляються у переміщеннях осі трубопроводу. Це, в свою чергу, призводить до зміни напружено-деформованого стану, показники якого регламентують міцність та працездатність трубопроводу [1, 2]. Актуальність дослідження пов'язана із появою критичних значень показників НДС у процесі експлуатації трубопроводів, що призводять до руйнування металу і виникнення аварійних ситуацій [3].

Особливо потенційно небезпечними з цієї точки зору є ділянки надземних переходів, на яких трубопроводи працюють у важких експлуатаційних умовах під дією додаткових факторів зовнішнього навантаження, що спричиняє високий ступень ризику виникнення аварійних ситуацій.

У зв'язку з цим передбачено постійне проведення контролю за технічним станом об'єктів. Обмеженість інформації з даних обстежень вимагає розробки нових методик адекватного оцінювання НДС. Тож пошук параметрів, які б корелювалися з показниками напру-

жено-деформованого стану трубопроводів, стає невід'ємним компонентом методик оцінки НДС трубопроводів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальні підходи до визначення НДС трубопроводів наведено в роботах [1, 2]. Теоретичним положенням робіт є визначення показників НДС трубопроводу за його деформованою віссю. Для цього автори використовують набір дискретних даних у вигляді координат точок на твірній трубопроводу. З використанням різних методик отримують рівняння плавних кривих у вигляді сплаймів, за якими можна визначити величини згинаючих моментів. На практиці дані методи, які успішно використовують на ділянках підземного залягання трубопроводів, можуть бути застосовані і для відкритих ділянок у конструкціях надземних переходів. Однак, особливості в деформаційних процесах трубопроводу на надземних переходах дозволяє запропонувати нові специфічні підходи до методик оцінки НДС.

Слід відмітити, що деформації трубопроводів на надземних переходах мають характерний вигляд. Більшість дослідників вважають, що деформована лінія осі наближена до форми дуги кола [4]. Методика розрахунку радіуса дуги кола за геодезичними вимірами деформованого трубопроводу наведена в статтях [1, 4]. Водночас, в літературі ведеться дискусія про неадекватність таких критеріїв щодо оцінки



Рисунок 1 – Опорна конструкція вантового типу на надземному переході трубопроводу

НДС трубопроводу. Так, група авторів [5] вважає, що величина радіуса кривизни сильно залежить від групи точок, які беруть участь у розрахунку радіуса.

Враховуючи те, що надземні переходи характеризуються своєю відкритістю та легкою доступністю у порівнянні з трубопроводами підземного залягання, до них можуть застосовуватися різноманітні методи збору даних – як безпосереднього контакту, так і безконтактні. До останніх належать геодезичні методи наземного контролю, які дозволяють визначити координати характерних точок [6]. За допомогою інструментальної зйомки одержують координати замаркованих точок на газопроводі, використовуючи при цьому відносну систему координат [7]. Сучасні методи дистанційного дослідження, такі як інтерферометрія, застосовано для пошуку критичних місць підземного газопроводу за дискретними координатами у вигляді осідань поверхні внаслідок зсувних процесів прилеглої території [8].

У роботі [9] також розроблено розрахункові моделі для визначення допустимих переміщень підземних газопроводів у вертикальній і горизонтальній площинах. Важливим аспектом роботи є розроблення методики встановлення точності геодезичних робіт для геодезичного моніторингу просторового стану підземних магістральних газопроводів. Однак точність власне критеріїв оцінки НДС трубопроводу авторами не розглядається.

Постановка завдання

Проблеми зміни в НДС трубопроводів як наслідок їх тривалої експлуатації розглянемо на прикладі надземного переходу через р. Бистриця-Надвірнянська в м. Івано-Франківськ (рис. 1). Даний надземний перехід складається з двох прольотів довжиною по 50 м. Перехід відноситься до вантових типів, так як має додаткові ванти. Їх призначення – підтримання трубопроводу у підвішеному стані і зменшення режиму навантаження. Трубопровід на кожному прольоті утримується двома вантами зліва та справа. При рівномірному навантаженні ванти здатні знизити НДС трубопроводу на 10–15% [10].

Однак, з часом натяги вант слабнуть, що призводить до втрати їх несучих функцій з одночасним зростанням НДС. Система трубопроводу переходить у режим несиметричного навантаження. Режим несиметричного навантаження трубопроводів можна зафіксувати методами геодезичної зйомки, з якої випливає, що знаходження максимальної стріли прогину не співпадає із серединою прольоту, а має незначне зміщення.

Аналогічні результати отримано при обстеженні газопроводу «Угерсько–Івано-Франківськ», а також газопроводу «Острогозьк–Шебелинка» в статті [11]. Основні характеристики трубопроводів та їх параметри деформації зведено у таблиці 1.

Вказані дані про деформації трубопроводів, найважливіше значення величин максима-

Таблиця 1 – Основні характеристики та розміри деформацій трубопроводів на надземних переходах

| № | Трубопровід | Тип кріплення | Транспортований продукт | Діаметр трубопроводу D , мм | Товщина стінки трубопроводу t , мм | Довжина прольоту, м | Геометричні параметри деформації, м | | |
|---|---|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | | | Макс. прогин f_{max} | Координата розміщення X_f | Зміщенні відносно середнього прольоту |
| 1 | Водопровід | Вантовий | вода | 820 | 2,5 | 50 | 0,4–0,6 | 25,7–28,3 | 0,7–3,3 |
| 2 | Газопровід «Угерсько–Івано-Франківськ» | Утримуючі канати | газ, тиск 3,0 МПа | 500 | 7 | 65 | 0,1 | 30 | 2,5 |
| | | | | | | 130 | 0,17 | 59 | 6,1 |
| 3 | Газопровід «Острогозьк–Шебелинка» [11]. | Балковий (без проміжних опор) | газ, тиск 5.4 МПа | 1220 | 12 | 45,7 | 0,302 | 18 | 4,85 |

льних прогинів і місце їх локалізації, ще не дають підстав для оцінки напружено-деформованого стану. Адже, характер зовнішнього навантаження залишається невідомим. А звідси невідомі силові фактори в перерізах трубопроводу, й саме головне – значення внутрішніх напружень у стінках трубопроводу, які є основним критерієм в оцінці НДС.

Враховуючи невизначеність силових факторів, а також те що конфігурація зігнутого трубопроводу наближена до форми дуги, доцільно перейти до інших критеріїв НДС. Одним з можливих критеріїв є радіус кривизни R нейтральної осі трубопроводу.

Існуючі галузеві методики оцінки НДС трубопроводів регламентують використовувати як показник надійності радіус, а кривизни осі трубопроводу не враховують зміщення стріли прогину [12]. Радіус кривизни трубопроводу зазвичай обчислюється за координатами трьох точок, а умова міцності експлуатації трубопроводу записується у вигляді

$$R > R_{\text{доп}}, \quad (1)$$

де $R_{\text{доп}}$ – мінімально допустимий радіус кривизни даного трубопроводу [12].

Однак, при запису умови (1) не розмежовано такі поняття, як “радіус кривизни ділянки трубопроводу” і “радіус кривизни в точці нейтральної осі”. Тож виникає ситуація, коли отриманий радіус кривизни не є мінімальним, а тому дає занижені показники НДС трубопроводу, що не відображає реальний стан навантаження.

Крім того, не розглянуто питання впливу несиметричності навантаження на НДС трубопроводу.

У зв’язку з тим, що конструкції надземних переходів трубопроводів характеризують однойменні параметри, такі як: довжина прольоту, діаметр труби, товщина стінки, властивості транспортованого продукту і т.п. (табл. 1), тому методику оцінки НДС трубопроводів доцільно розробляти на базі теорії геометричної подібності конструкцій, що дозволить застосовувати єдиний критерій до оцінки НДС трубопроводів різних типів.

Мета дослідження полягає у розробці методичних підходів до реальної оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів у випадках їх несиметричного навантаження на ділянках надземних переходів.

Задача дослідження полягає в отриманні спочатку виразу радіуса кривизни геометрично подібних трубопроводів при симетричному навантаженні, а потім за допомогою поправкових коефіцієнтів поширенні результату на трубопроводи надземних переходів у випадках їх несиметричного навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження

Оскільки фактори зовнішнього навантаження на трубопровід є невідомими, то розглянемо можливість використання величини мінімального радіуса кривизни трубопроводу як критерію оцінки НДС. Для цього прольотні конструкції надземних переходів трубопроводів зведемо до єдиної геометрично подібної схеми (рис. 2). На схемі показано трубопровід, що знаходиться на двох опорах A і B , відстань між якими L . Під дією зовнішнього наванта-

ження він деформується, утворюючи максимальну стрілу прогину f_{max} . Припустимо, що лінія деформації осі трубопроводу набула форми дуги кола радіусом R . Встановимо аналітичну залежність між радіусом кривизни трубопроводу і геометричними параметрами деформаційного процесу.

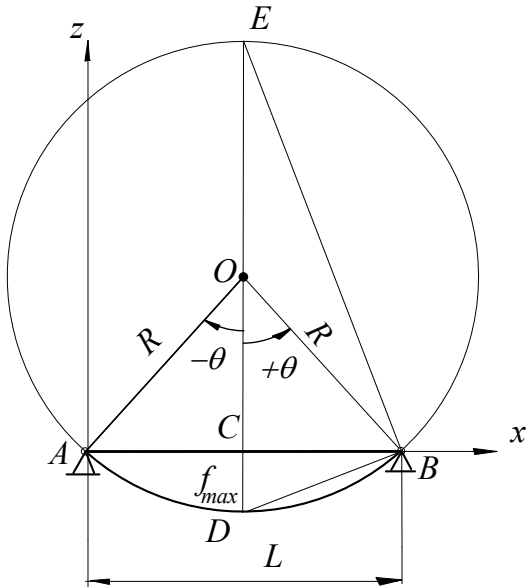


Рисунок 2 – Знаходження радіуса кривизни деформації трубопроводу за принципом геометричної подібності

Згідно з поставленою задачею розглянемо спочатку випадок симетричного навантаження трубопроводу. Лінію деформації осі апроксимуємо дугою AB радіусом R . Це означає, що абсциса координати точки C максимального прогину набуде значення $X_f = L/2$, а максимальний прогин становить $f_{max} = CD$.

Через три характерні точки A, D, B проведемо коло радіусом R з центром в точці O . Задача з визначення НДС зведеться до знаходження радіуса кривизни на основі геометричної подібності трубопроводів.

Розмістимо прольотну конструкцію трубопроводу в декартовій системі координат XAZ (рис. 2) з початком в точці A лівої опори. Сис-

тема координат умовна, в ній вісь абсцис X спрямована вздовж осі трубопроводу до деформації, а вісь ординат Z – вертикальна на ній фіксують величини переміщень перерізів трубопроводу.

Для отримання спільних закономірностей деформації трубопроводів на принципах геометричної подібності перейдемо до полярної системи координат з центром в точці O і полярною віссю OD . Положення точки O співпадає із серединою прольоту AB і знаходиться на висоті $R - f_{max}$. Декартові координати точки O , а також характерних точок осі трубопроводу A, B, D занесено до таблиці 2.

В полярній системі координат положення характерних точок буде задаватися радіусом кривизни R і кутом θ відхиленням від полярної осі OD . Причому при відхиленні вправо значення кута θ буде додатним, а при відхиленні вліво – від’ємним.

Знаходимо радіус кривизни як критерій оцінки НДС трубопроводу за принципом геометричної подібності. Встановимо залежність між радіусом кривизни кола R і величиною максимального прогину f_{max} , який відображається відрізком CD . Для цього точку O центра полярної системи координат з’єднаємо з характерними точками A, B, D , що лежать на дузі кола рівними відрізками $OA = OB = OD = R$. Після вказаних побудов отримаємо $\triangle DEB$, з якого запишемо очевидні залежності

$$BC^2 = EC \cdot CD, \text{ або}$$

$$\left(\frac{L}{2}\right)^2 = (2R - f_{max}) \cdot f_{max},$$

а з урахуванням $2R \gg f_{max}$ ($DE \gg CD$) маємо

$$L^2 = 8R \cdot f_{max}.$$

Звідси шуканий радіус R отримаємо через величину прогину f_{max} :

$$R = \frac{L^2}{8f_{max}}. \quad (2)$$

Формула (2) радіуса кривизни отримана для випадку симетричного навантаження. Роз-

Таблиця 2 – Значення дискретних координат характерних точок деформованого трубопроводу в декартовій і полярній системах координат

| Точки деформованого трубопроводу | Декартові координат XAZ | | Полярні координати | |
|---|---------------------------|---------------|--------------------|-----------|
| | X | Z | Довжина | Кут |
| Опора A | 0 | 0 | R | $-\theta$ |
| Опора B | L | 0 | R | θ |
| Середина прольоту перерізу трубопроводу D у деформованому стані | $L/2$ | f_{max} | R | 0 |
| Центр полярної системи координат O | $L/2$ | $R - f_{max}$ | 0 | 0 |

Таблиця 3 – Використання положень теорії деформованої осі балки в прольотних конструкціях в оцінці НДС трубопроводів

| № | Формування теоретичних положень деформованої осі балки | Використання теоретичних положень в оцінці НДС трубопроводу | Схема / формули |
|---|---|---|--|
| 1 | Моделювання несиметричного режиму НДС трубопроводу під дією зосередженої сили P здійснюється варіюванням параметра a ($a \geq b$) | Приймається гіпотеза про навантаження трубопроводу зосередженою силою P | |
| 2 | Максимальний згинаючий момент | Перехід до мінімального радіусу згину | $M_{\max} = \frac{Pab}{L} \quad (3)$ |
| 3 | Відстань до максимального прогину | Наявність зміщення максимального прогину f_{\max} відносно середини прольоту на величину Δ | $X_f = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}} \quad (4)$ |
| 4 | Величина максимального прогину | | $f_{\max} = \frac{PbL^2\sqrt{3}}{27EJ} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{b^2}{L^2}\right)^3}, \quad (5)$ <p>де EJ – жорсткість трубопроводу</p> |
| 5 | Положення максимального прогину [13]: при $b = a$, $X_f = 0,5 L$; при $b \rightarrow 0$, $X_f = 0,577 L$ | Інтервал зміни безрозмірного коефіцієнта $k = \frac{X_f}{L}$ | $0,5 \leq k \leq 0,577 \quad (6)$ |

глянемо можливість поширити формулу (2) для реальних випадків навантаження зі знаходженням мінімального радіусу кривизни шляхом застосування поправкових коефіцієнтів, враховуючи несиметричність навантаження.

Отримання модифікованої формули мінімального радіусу кривизни трубопроводу для випадків несиметричного навантаження здійснено з урахуванням положень деформованої осі балки на двох опорах.

Була прийнята гіпотеза про подібність лінії згину несиметричного навантаження із випадком прольотної балки, що навантажена зосередженою силою P . Використано основні положення теорії деформації осі балки [13]:

- моделювання несиметричного режиму НДС трубопроводу під дією зосередженої сили P здійснюється зміною параметра a ;

- максимальний згинаючий момент M_{\max} виникає в перерізі прикладання зосередженої сили P ;

- величина максимального прогину задається формулою (5);

– координата максимального прогину X_f не співпадає з розміщенням максимального моменту M_{\max} .

Враховуючи обернено-пропорційну залежність між моментом згину M та радіусом кривизни R ($M = EJ/R$), а також діапазон зміни згинаючого моменту по довжині у прольотних конструкціях $0 \leq M(x) \leq |M_{\max}|$, запишемо діапазон зміни радіусу кривизни трубопроводу як $R_{\min} \leq R(x) \leq |\infty|$. Власне мінімальний радіус кривизни R_{\min} і буде критерієм оцінки НДС трубопроводу у випадках несиметричного навантаження.

Аналізуючи дані основних теоретичних положень деформації прольотної конструкції (табл. 3), можемо зауважити, що зміщення координати точки перерізу з мінімальним радіусом кривизни становить $\Delta = X_f - L/2$.

В загальноприйнятій формулі (5) зробимо такі перетворення: спочатку зосереджену силу P виразимо через максимальний момент M_{\max} згідно з (3), пізніше – через радіус кривизни трубопроводу R_{\min} :

$$f_{\max} = \frac{M_{\max} L^3 \sqrt{3}}{27 E J \cdot a} \sqrt{\left(1 - \frac{b^2}{L^2}\right)^3} = \frac{L^3 \sqrt{3}}{27 R_{\min} \cdot a} \sqrt{\left(1 - \frac{b^2}{L^2}\right)^3} \quad (7)$$

Здійснимо перетворення формули (7), записавши в ній лише ті геометричні параметри, які підлягають геодезичним вимірам (L, f_{\max}, X_f), і виключимо з формули невідомий параметр a . Для цього введемо коефіцієнт несиметричності

навантаження трубопроводу $k = \frac{X_f}{L}$, через

який виразимо відносно величину $\frac{a}{L}$:

$$\frac{a}{L} = 1 - \sqrt{1 - 3k^2}.$$

Тоді отримаємо вираз мінімального радіусу кривизни, який після перетворень зведемо до вигляду (2)

$$R_{\min} = \frac{X_f^2}{3 f_{\max}} \cdot \frac{k}{1 - \sqrt{1 - 3k^2}} = \frac{L^2}{8 f_{\max}} \cdot \frac{8k^3}{3(1 - \sqrt{1 - 3k^2})} = \frac{L^2}{8 f_{\max}} \cdot \psi(k), \quad (8)$$

де $\psi(k)$ – безрозмірна функція, що розраховується за формулою

$$\psi(k) = \frac{8k^3}{3(1 - \sqrt{1 - 3k^2})}. \quad (9)$$

Порівнюючи отриманий вираз мінімального радіуса кривизни R_{\min} (8) для випадків несиметричного навантаження трубопроводу з попереднім виразом радіуса R (2) при апроксимації лінії згину трубопроводу формою дуги кола при довжині прольоту L , отримаємо

$$R_{\min} = R \cdot \psi(k). \quad (10)$$

Враховуючи те, що коефіцієнт k може змінюватися в інтервалі (6), можливий інтервал зміни безрозмірної функції становитиме $0,53 < \psi(k) < 0,66$. З урахуванням можливого діапазону $\psi(k)$ формула (10) з введенням поправкового коефіцієнта набуде вигляду

$$R_{\min} = (0,53 \dots 0,66) \cdot R = (0,53 \dots 0,66) \cdot \frac{L^2}{8 f_{\max}}. \quad (11)$$

Проаналізуємо отриманий вираз мінімального радіуса кривизни трубопроводу (11) для випадків несиметричного навантаження.

Як бачимо, апроксимація зігнутої осі трубопроводу дугою кола дає занижену на 34-36 % оцінку в НДС. Причому максимальне значення $\psi(k) = 0,66$ при симетричному навантаженні свідчить, що радіус кривизни трубопроводу менший від апроксимованого на 34 %. А у випадках несиметричного навантаження ця розбіжність зростає і може сягати значення $\psi(k) = 0,53$. Тобто, при несиметричному навантаженні розбіжність у визначенні мінімального радіуса кривизни збільшується до 46 %.

Таким чином, отримані формули мінімального радіуса кривизни (8) і (11) поширено для випадків несиметричного навантаження трубопроводів на надземних переходах шляхом введення поправкового коефіцієнта. Числове значення поправкового коефіцієнта визначається формулою (9), і залежить від несиметричності навантаження k .

Можливість використання формул (8) і (11) для оцінки напружено-деформованого стану трубопроводів у випадка їх несиметричного навантаження підтверджено експериментальними даними для ділянок надземного переходу вантового типу (рис. 1). За результати геодезичних обстежень було отримано дискретні координати точок твірної деформованого трубопроводу на двох прольотах. Графіки зігнутої осі трубопроводу на прольотах 1 і 2 (рис. 3) наведено в умовній системі координат, вертикальна вісь якої має значення висот за Балтійською системою [6].

Для кожного із прольотів було визначено максимальну стрілу прогину f_{\max} , а також місце її локалізації, яке задається координатою X_f . Так, значення величин максимальних прогинів для прольотів 1 і 2 становили відповідно $f_{\max 1} = 0,4$ м і $f_{\max 2} = 0,6$ м, а місце їх локалізації – $X_{f1} = 25,7$ м і $X_{f2} = 28,3$ м.

Отже, якщо в надземному переході трубопроводу прольот 1 ще можна розглядати як симетрично навантажений, то на прольоті 2 спостерігається явне порушення симетричності навантаження. Зміщення від центру прольоту становило 3,3 м. Крім того, з графіка 4 видно, що параметри деформації трубопроводу на прольоті 2 більші, а отже і напруження у перерізах труби будуть вищі.

За дискретними даними координат здійснено оцінку НДС трубопроводу за радіусом кривизни на прольотах 1 і 2. В таблиці 4 наведено результати порівнянь теоретичних положень розрахунку радіусів кривизни за формулами (2) і (8) з експериментальними даними (рис. 3) надземного переходу вантового типу,

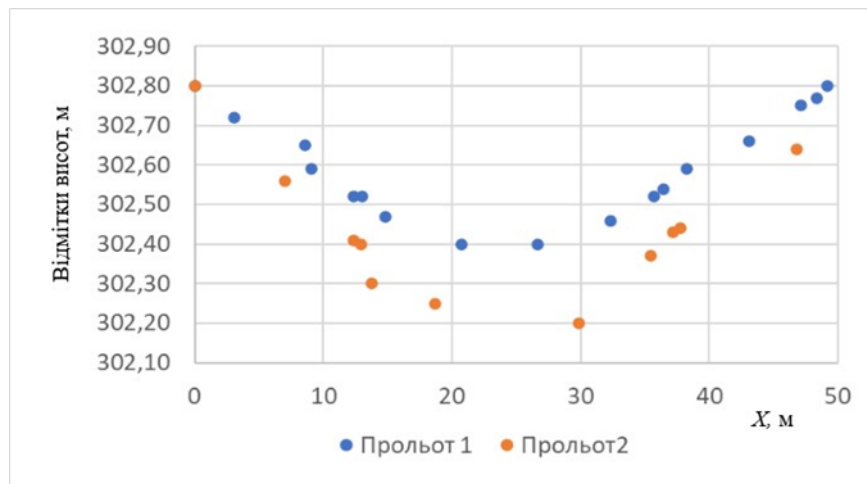


Рисунок 3 – Результати геодезичних обстежень деформацій трубопроводу вантового переходу на прольотах 1 і 2

Таблиця 4 – Результати теоретичних і експериментальних досліджень оцінки НДС на ділянках надземних переходів

| Надземний перехід | Теоретичні розрахунки | | Результати опрацювання експериментальних даних за методикою [8] | |
|-------------------|--|--|---|--|
| | Постійний радіус кривизни R за формулою (2), м | Мінімальний радіус кривизни R_{\min} з урахуванням поправкових коефіцієнтів за формулою (8), м | Постійний радіус кривизни R , м | Мінімальний радіус кривизни R_{\min} , м |
| Прольот 1 | 781 | 518 | 780 ± 10 | 497 ± 38 |
| Прольот 2 | 473 | 293 | 467 ± 8 | 300 ± 12 |

які опрацьовувалися за загальноприйнятою методикою [8].

За результати експериментальних даних було отримано координати точок з похибкою не більше 5 мм. Далі за експериментальними даними розраховувалися величини радіусів кривизни постійного R і мінімального R_{\min} . Для цього вибиралася група координат з трьох точок на ділянці довжиною l . При розрахунку постійного радіуса R довжина ділянки дорівнювала довжині прольоту, тобто $l = L = 50$ м. Що стосується пошуку мінімального радіусу кривизни R_{\min} , то для забезпечення його достовірності необхідно зменшити довжину ділянки l аж до виконання умови $l \rightarrow 0$ [1]. Враховуючи можливості геодезичних методів, довжину ділянки була обрано як $l = 12$ м.

З урахуванням можливих похибок було отримано наступні результати (табл. 4).

Таким чином, розрахункові теоретичні значення, як постійних радіусів ($R = 781$ м і $R = 473$ м), так і мінімальних радіусів ($R_{\min} = 518$ м і $R_{\min} = 293$ м) трапляються до діапазону достовірності експериментальних даних.

Висновки

Розглянуто деформаційні процеси трубопроводів різного призначення і показано, що для трубопроводів на ділянках надземних переходів характерний процес несиметричного навантаження, якій проявляється у зміщенні стріли максимального прогину відносно середини прольоту.

Деформаційні процеси трубопроводів різного призначення на ділянках надземних переходів доцільно вивчати за принципом їх геометричної подібності з веденням безрозмірного коефіцієнта несиметричності k як відношення місця розміщення стріли максимального прогину X_f до довжини всього прольоту L ($k = X_f/L$).

На основі геометричної подібності трубопроводів отримано формулу мінімального радіуса кривизни трубопроводу, доповнену безрозмірною функцією $\psi(k)$, що дозволяє оцінювати напружено-деформований стан трубопроводів різного призначення у випадках їх несиметричного навантаження на ділянках надземних переходів.

Підтверджено узгодженість теоретичних результатів мінімального радіуса кривизни з експериментальними даними.

Література

1. Олійник, А.П., Григорчук Г.В., Говдяк Р.М. Застосування методів математичного моделювання для оцінки технічного стану трубопроводів та стану довкілля. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. № 1. С. 97-103. DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-97-103

2. Жовтуля Л.Я., Олійник А.П., Яворський А.В., Карпаш М.О. Розроблення методики оцінки напружено-деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. № 1. С.57-63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metody_2017_1_9

3. Тараєвський О. Деякі аспекти технічного стану магістральних трубопроводів із урахуванням їх тривалої експлуатації. *Нафтогазова галузь України*. 2014. №6. С. 43-46.

4. Харченко Є.В., Кичма А.О., Савула Р.С. Аналіз пружно-пластичного деформування ділянки магістрального газопроводу з урахуванням зміцнення матеріалу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 442–448.

5. Александров А.А., Сушев С.П., Ларионов В.И., Валекжанин Д.Ю. Определение прочности подземных участков трубопроводов по результатам обследования планово-высотного положения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер. "Машиностроение". 2011. № 4. С.16–23.

6. Тревого І.С., Ільків Є.Ю., Кухтар Д.В. Геодезичний контроль деформацій споруд магістральних газопроводів: монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. 181 с.

7. Банахевич Р.Ю., Крупка В.О., Марчук О.М. Досвід діагностичного обстеження вантового переходу МГ Івацевичі – Долина П н. через ріку Дністер. *Теорія і практика будівництва*. 2011. № 7. С. 24–27.

8. Pakshyn M., Lyaska I., Burak K., Kovtun V., Dorosh L., Grytsyuk T., Hrynishak M., Mykhailyshyn V. Estimation of earth's surface moves and deformation of the territory of mine "Khotin" of Kalush-golinskyu field by method of radar interferometry. *Geodesy and Cartography Vilnius*, 2019 – ISSN 2029-6991 / EISSN 2029-7009 2019 Vol. 45 Issue 1: P. 37–42 URL: <https://doi.org/10.3846/gac.2019.6300>. Scopus

9. Чибіряков В.К., Староверов В.С., Нікітенко К.О. Загальний підхід до моделювання на-

пруженодеформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної точності вимірювання. *Інженерна геодезія*, 2016, вип. 63. С. 14–19.

10. Коробков О.Ю., Ріпецький Є.Й., Ріпецький Р.Й., Олесків Р.С., Математичне моделювання в задачах геодезичного контролю напружено-деформованого стану газопроводів на ділянках надземних переходів. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1(33). С. 56-65. DOI: 10.31471/1993-9868-2020-1(33)-56-65.

11. Романов С.В. Застосування геодезичного методу визначенні параметрів напружено-деформованого стану магістральних газопроводів на ділянках повітряних переходів. *Оптичні та фізико-хімічні вимірювання*. 2016. (56). С. 52-55.

12. НПОП 60.3-1.01-10 «Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів».

13. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. 608 с.

References

1. Oliinyk, A.P., Hryhorchuk H.V., Hovdiak R.M. Zastosuvannia metodiv matematychnoho modeliuvannia dlia otsinky tekhnichnoho stanu truboprovodiv ta stanu dovkillia. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2019. No 1. P. 97-103. DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-97-103. [in Ukrainian]

2. Zhovtulia L.Ia., Oliinyk A.P., Yavorskyi A.V., Karpash M.O. Rozroblennia metodyky otsinky napruzhenno-deformovanoho stanu liniinykh dilianok mahistralnykh truboprovodiv. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2017. No 1. P.57-63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/metody_2017_1_9 [in Ukrainian]

3. Taraievskiy O. Deiaki aspekty tekhnichnoho stanu mahistralnykh truboprovodiv iz urakhuvanniam yikh tryvaloї ekspluatatsii. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2014. No 6. P. 43-46. [in Ukrainian]

4. Kharchenko Ye.V., Kychma A.O., Savula R.S. Analiz pruzhno-plastychnoho deformuvannia dilianky mahistralnoho hazoprovodu z urakhuvanniam zmitsnennia materialu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2013. No 755. P. 442–448. [in Ukrainian]

5. Aleksandrov A.A., Sushev S.P., Larionov V.I., Valekzhanin D.Yu. Opredelenie prochnosti podzemnykh uchastkov truboprovodov po rezultatsam obsledovaniya planovo-vyisotnogo polozheniya. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.*

“*Mashinostroenie*”. 2011. No 4. P.16–23. [in Russian]

6. Trevoho I.S., Ilkiv Ye.Iu., Kukhtar D.V. Heodezychnyi kontrol deformatsii sporud mahistralnykh hazoprovodiv. Monohrafiia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2019. 181 p. [in Ukrainian]

7. Banakhevych R.Iu., Krupka V.O., Marchuk O.M. Dosvid diahnostychnoho obstezhennia vantovoho perekhodu MH Ivatsevychi – Dolyna II n. cherez riku Dnister. *Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2011. No 7. P. 24–27. [in Ukrainian]

8. Pakshyn M., Lyaska I., Burak K., Kovtun V., Dorosh L., Grytsyuk T., Hrynishak M., Mykhailyshyn V. Estimation of earths surface moves and deformation of the territory of mine “Khotin” of Kalush-golinsky field by method of radar interferometry. *Geodesy and Cartography Vilnuc*, 2019 – ISSN 2029-6991 / EISSN 2029-7009 2019 Vol. 45 Issue 1: P. 37–42 URL: <https://doi.org/10.3846/gac.2019.6300>. Scopus

9. Chybiriakov V.K., Starovierov V.S., Nikitenko K.O. Zahalnyi pidkhid do modeliuвання napruzhenodeformovanoho stanu mahistralnoho hazoprovodu dlia vyznachennia heodezychnoi tochnosti vymiriuvannia. *Inzhenerna heodeziia*, 2016, Vol. 63. P. 14–19. [in Ukrainian]

10. Korobkov O.Iu., Ripetskyi Ye.I., Ripetskyi R.I., Oleskiv R.Ie., Matematychno modeliuвання v zadachakh heodezychnoho kontroliu napruzhenodeformovanoho stanu hazoprovodiv na diliankakh nadzemnykh perekhodiv. *Naftohazova enerhetyka*. 2020. No 1(33). P. 56-65. DOI: 10.31471/1993-9868-2020-1(33)-56-65. [in Ukrainian]

11. Romanov S.V. Zastosuvannia heodezychnoho metodu vyznachenni parametriv napruzhenodeformovanoho stanu mahistralnykh hazoprovodiv na diliankakh povitrianykh perekhodiv. *Optychni ta fizyko-khimichni vymiriuvannia*. 2016. Vol.56. P. 52-55. [in Ukrainian]

12. NPOP 60.3-1.01-10 «Pravyla bezpechnoi ekspluatatsii mahistralnykh hazoprovodiv». [in Ukrainian]

13. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov. M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka», 1976. 608 p. [in Russian]