

# БЕЗКОНТАКТНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО - ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ДІЛЯНКИ ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ З ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

Л.Я. Жовтуля, А.В. Яворський, А.П. Олійник, Л.Я. Побережний,  
В.Я. Попович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

**Abstract.** The object of the study is the stresses that affect the underground sections of main pipelines. The authors developed a method for determining the change in the stress-strain state of the underground part of the main oil and gas pipelines according to the data about the displacement of a certain set of points of the axis of the pipeline and confirmed by the results of tensometric measurements of stresses in the pipe body.

Вирішення проблеми безпеки та надійності експлуатації трубопровідних систем є одним з пріоритетних напрямків будь-якої держави. Завдання полягає у забезпеченні довготривалої механічної стійкості, надійності та безпеки експлуатації трубопровідних мереж. В останні роки проблема забезпечення надійної і довготривалої механічної стійкості протяжних інженерних споруд все частіше розглядається в напрямку оцінки і прогнозування процесів, які проходять у земній корі. Згідно статистики аварійності трубопроводів опублікованої EGIG [1] – 14,9% причин виникнення аварій - геодинамічні процеси (пошкодження трубопроводів в результаті активності земної поверхні: зсуви, селі тощо).

При перетині ерозійних форм рельєфу нафтогазопроводами в них утворюються вигини (згини), зокрема, у вертикальній площині на коротких відстанях. При підсиленні геодинамічних напружень і зовнішніх впливів на таких ділянках можуть локально зростати навантаження, стимулюючи порушення герметичності і цілісності трубопроводу. Переміщення осі трубопроводу призводить до зміни напружено деформованого стану, критичні значення якого призводять до руйнування металу.

Аналіз існуючих методів визначення напружено-деформованого стану нафтогазопроводів в умовах геологічного ризику [2] дав змогу оцінити їх переваги та недоліки. Основною завадою стає важко доступність підземних нафтогазопроводів для контактних методів діагностики. Виходячи з цього, актуальним завданням є створення системи для запобігання аварій трубопроводів, прокладених в складних інженерно-геологічних умовах. Для вирішення цієї задачі, в процесі подальших досліджень необхідно встановити вплив зміни умов і параметрів експлуатації на міцність і стійкість трубопроводу, а також знайти потенційно небезпечні ділянки.

В результаті теоретичних досліджень було розроблено метод визначення зміни напружено-деформованого стану підземної ділянки нафтогазопроводу за даними про переміщення певної множини точок [3] на основі розробленої математичної моделі процесу деформування підземної ділянки трубопроводу під дією ваги ґрунту та його руху.

В якості вхідних даних для визначення напружень використовуються значення переміщень певної множини точок осі трубопроводу. Для цього порівнюється визначене та проектне просторове положення нафтогазопроводу. Визначення просторових координат осі нафтогазопроводу проводиться безконтактним методом, використовуючи сучасні трасошукачі та засоби глобального позиціонування.

При моделюванні процесу деформування підземних ділянок магістральних трубопроводів за даними про зміну просторової конфігурації їх осі використовується підхід, запропонований в [4] для надземних ділянок трубопроводів. В даному випадку з використанням експериментальних методів [5] визначається геометрична конфігурація осі трубопроводу з деякою точністю в контрольний момент часу.

Для проведення дослідження обрано лінійну ділянку магістрального газопроводу «Пасічна-Долина» Ду 500 на км 5.1, де у 2010-ому році відбувся зсув ґрунту, що створив силовий тиск на трубопровід, внаслідок чого виник розрив трубопроводу.

За початкове положення трубопроводу прийнято дані геодезичного обстеження проведених ПАТ «Прикарпаттрансгаз» (Рисунок 1) у вигляді топографічного плану із нанесеною трасою трубопроводу та відомістю координат осі трубопроводу. Геодезична зйомка проводилась після ремонтних робіт внаслідок зсуву ґрунту у 2010 році.

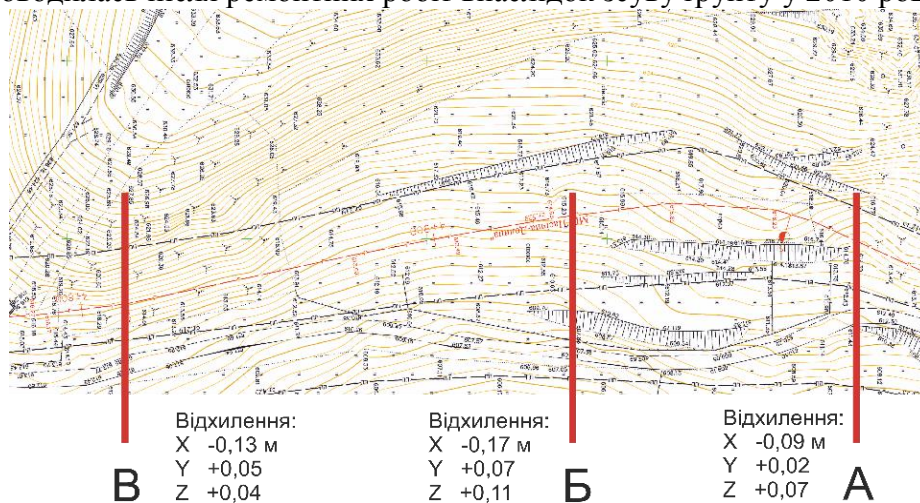


Рисунок 1. Фрагмент топографічної карти геодезичної зйомки положення магістрального трубопроводу

Накладанням на первинний профіль траси координат вимірюваного дійсного положення осі трубопроводу були одержані дані, необхідні для визначення величини напружено-деформованого стану трубопроводу за розробленою методикою.

Вихідними даними для розрахунку є значення переміщень певної множини точок осі трубопроводу, що виражаються як функції, які описують зміну геометрії досліджуваної ділянки відповідно в радіальному, поперечному та повздовжньому напрямках:  $\rho(s, \varphi, r, t)$ ;  $\omega(s, \varphi, r, t)$ ;  $\Psi(s, \varphi, r, t)$ . Вони є або заданими, або ж такими, що виражаються в процесі розв'язання задачі.

Для радіус-вектора точки трубопроводу записується таке співвідношення:

$$\begin{aligned}
 R(s, \varphi, r, t) = & r_1(s, \varphi, r, t) + \rho(s, \varphi, r, t) \times \\
 & \times (\cos \omega(s, \varphi, r, t) b_1^p + \sin \omega(s, \varphi, r, t) h_1^p) + \\
 & + \Psi(s, \varphi, r, t) T_1^p - \frac{D}{2} h_1^p
 \end{aligned}
 \quad (1.1)$$

де  $s, \varphi, r$  – пов'язані з досліджуваною ділянкою підземного трубопроводу, який моделюється криволінійним циліндричним тілом, координати відповідно:

$s$  – вздовж осі трубопроводу;

$\varphi$  – по полярному куту ;

$r_1^p$  – радіус-вектор точки на верхній твірній трубопроводу;

$D$  – зовнішній діаметр трубопроводу;

$\rho(s, \varphi, r, t)$ ;  $\omega(s, \varphi, r, t)$ ;  $\Psi(s, \varphi, r, t)$  – функції, які описують зміну геометрії досліджуваної ділянки відповідно в радіальному, поперечному та повздовжньому напрямках і є або заданими, або ж такими, що виражаються в процесі розв'язання задачі;

$T_1^p$ ;  $b_1^p$ ;  $h_1^p$  - вектори дотичної бінормалі та нормалі до верхньої твірної.

При побудові математичної моделі використано такі допущення:

- оскільки єдиною вихідною інформацією про зміну геометрії підземної ділянки є координати її деформованої осі, то в залежності (1.1) приймається, що координати

верхньої твірної визначаються експериментально і задаються у вигляді координат точок  $s_i; y(s_i); z(s_i)$ , а для одержання  $(s; y(s); z(s))$  використовується інтерполяційна, або апроксимаційні процедури [Ошибка! Источник ссылки не найден.,7], тоді як жодної інформації про характер поведінки  $\rho(s; \varphi; r; \tau)$ ;  $\omega(s, \varphi, r, \tau)$  та  $\psi(s, \varphi, r, \tau)$  немає, що обумовлює їх запис у такому вигляді, в якому це було записано для недеформованої ділянки. Якщо ж подання приводить до фізично нереальних результатів, вказані функції моделюються за методиками, вказаними в роботі [5], де враховується зміна конфігурації перерізів з різними типами її представлення – еліптичність, грушевидність, пропорційність параметрів еліптичності ступені деформованості осі – проте вказані підходи є вмотивовані для відкритих ділянок, коли інформація про деформацію перерізів є доступною, принаймні візуально.

– у випадку підземних ділянок подання рівнянн є обґрунтованим обмеженістю інформації про деформації перерізів. Цим же пояснюється вибір  $\psi(s, \varphi, r, \tau) = 0$ , оскільки для підземної ділянки перевірити, принаймні візуально, виконання гіпотези про плоскі перерізи також не видається можливим. Якщо ж при дослідженні підземної ділянки використовувати ті ж підходи, що і для наземної, то при різних способах задання  $\rho(s; \varphi; r; \tau)$ ;  $\omega(s, \varphi, r, \tau)$ ;  $\psi(s, \varphi, r, \tau)$  виникає ще одна проблема – для підземної ділянки складно записати рівняння рівноваги, оскільки практично неможливо врахувати в цих рівняннях дію масових сил (вага труби; вага продукту, вага ґрунту, яка діє на кожний переріз трубопроводу).

Складність та громіздкість розрахунків зумовила розробити програмний розрахунковий модуль, що дозволяє автоматично опрацювати дані.

Розроблена методика вимагає точного визначення координат осі трубопроводу. Значною перешкодою стає шар ґрунту над трубопроводом. Шурфуванням, із застосуванням геодезичних методів позиціонування, можна одержати дані про положення осі трубопроводу з максимальною точністю, але при цьому затрачаються значний час і ресурси. Нині існують технології, що дають можливість із субсантиметровою точністю визначити просторове положення трубопроводу з поверхні землі.



Рисунок 2 - Процедура одержання значень зміни НДС трубопроводу

На рисунку 2 зображено процедуру одержання значень зміни НДС трубопроводу, що проводиться в наступній послідовності: 1. Безконтактне визначення планового положення та глибини залягання газопроводу за допомогою вже описаного трасошукача. 2. За одержаними точками на поверхні землі визначаються їх просторові координати з допомогою високоточних GPS-приймачів. 3. Одержані дані записуються в електронному вигляді та передаються для опрацювання даних.

Для проведення промислових досліджень було обрано лінійну ділянку магістрального газопроводу «Пасічна-Долина» Ду 500 на 5,1 км, де 2010 року відбувся зсув ґрунту, що створив силовий тиск на трубопровід, і внаслідок чого виник розрив трубопроводу.

На рисунку 3 зображено графік розрахованих значень зміни напружень металу труб трубопроводу в рівномірно розподілених з інтервалом 20м точках твірних. Ці точки визначають поперечні перерізи досліджуваної ділянки труби, в яких було

розраховано значення зміни напружень у 16-ти рівномірно розподілених по колу точках перерізу. На графіку (рис. 3) бачимо, що аномальні зміни напружень зафіксовано на ділянці «400 - 600 м» трубопроводу, що додатково підтверджується результатами вимірювань тензOMETричними постами ТП1, ТП2, ТП3.

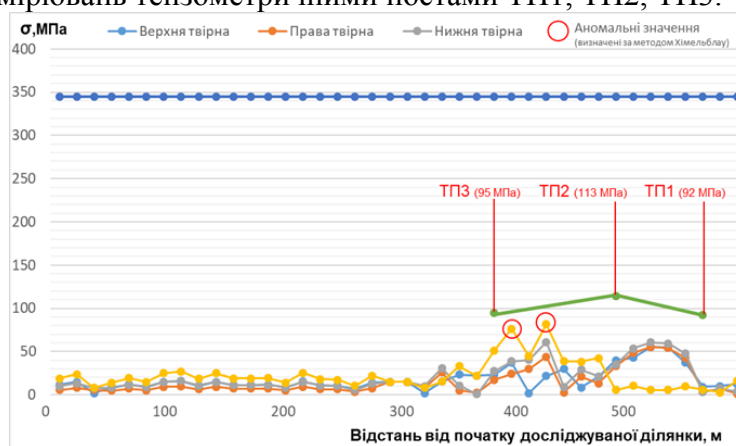


Рисунок 3. Графік зміни напружень труби досліджуваної ділянки газопроводу «Пасічна-Долина» Ду500 протяжністю 800 м

Нетипові умови експлуатації підземних трубопроводів на ділянках аномальної поведінки (заболочені території, карстові порожнини або технологічні виробки, місця просідання та сповзання ґрунту, зони тектонічних розломів, неотектоніки чи терасоутворення, сейсмо- та селенебезпечні райони) потребують додаткового аналізу. Слід зазначити, що для трубопровідних систем, прокладених у гірських районах, досить складно передбачити механічне навантаження на трубопровід. Це частково унеможливує застосування існуючих моделей оцінки НДС трубопроводів на подібних аномальних ділянках.

**Висновки:** запропонована методика дозволила в процесі дослідження визначити зміну напружено-деформованого стану трубопроводу на основі дійсного просторового положення осі такої комунікації. Достовірність результатів застосовуваної методики підтверджена результатами тензOMETричних вимірювань напружень в тілі труби.

#### Література

1. Gas pipeline incidents. 10-th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group. March 2018 (1970-2016). Режим доступу: ([https://www.egig.eu/reports/\\$97/\\$157](https://www.egig.eu/reports/$97/$157)).
2. A.V.Yavorskyi Safe operation of engineering structures in the oil and gas industry // A.V.Yavorskyi, M.O.Karpash, L.Y.Zhovtulia, L.Ya.Poberezhny, P.O.Maruschak / Journal of Natural Gas Science and Engineering October 2017 - Volume 46 – С.289-295.
3. Жовтуля Л.Я. Розроблення методики оцінки напружено-деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів /Жовтуля Л.Я. Олійник А.П. Яворський А.В. Карпаш М.О. // Методи та прилади контролю якості – Івано-Франківськ - 2017. - №38.
4. Олійник, А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації [Текст] / А. П.Олійник // Наукове видання. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 320 с.
5. Олійник, А. П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації [Текст] / А. П.Олійник // Наукове видання. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 320 с.
6. Самарский А. А. Численные методы: Учеб, пособие для вузо / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.
7. Марчук Г. И. МЕТОДЫ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ. МАТЕМАТИКИ / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1984. – 608 с.