

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОДЕЗИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ НА ДІЛЯНКАХ ПОВІТРЯНИХ ПЕРЕХОДІВ

*В роботі представлено приклади практичного застосування інструментально-розрахункового методу вимірювання механічних напружень металу магістральних газопроводів на ділянках повітряних переходів. Основою методу є створення адекватної математичної моделі повітряного переходу на основі результатів геодезичної зйомки. Підвищення точності моделі досягається за рахунок застосування високоточного лазерного тахеометра та ефективного алгоритму побудови розрахункової схеми. Аналіз достовірності застосування методу виконано шляхом порівняльного аналізу результатів моделювання з даними натурних спостережень та неруйнівного контролю.*

*Ключові слова: магістральний газопровід, геодезичні вимірювання, повітряний перехід, математичне моделювання.*

S.V. ROMANOV

Analytical Center «Algiz», Kyiv

### APPLICATION OF A GEODESIC METHOD FOR THE DETERMINATION OF STRESS-STRAIN STATE PARAMETERS IN AERIAL MAIN GAS PIPELINES CROSSINGS

*Abstract – Practical examples of an application of the instrumental calculation method for determining mechanical stress in the main gas pipelines crossings are presented. The method is based on the development of an adequate mathematic model for a crossing using geodesic data.*

*The increase of a model accuracy is achieved by the use of a high class laser tacheometer together with an effective model building algorithm.*

*Adequacy of models are confirmed by comparison analysis of the calculated and real data including non-destructive testing.*

*Keywords: main gas pipeline, geodesic measurement, aerial crossing, mathematical modeling.*

#### Вступ

Лінійна частина газотранспортної системи України з одного боку характеризується значною кількістю повітряних переходів через природні та штучні перешкоди, з іншого - тривалим терміном експлуатації, що у низці випадків перевищує 30 і більше років. Відкритість та легко доступність зовнішньої поверхні надземних трубопроводів порівняно з трубопроводами підземного залягання вимагає врахування додаткових навантажень на трубу, а також специфічних механізмів деградації металу. Протягом тривалого часу також відбуваються зміни характеристик трубопроводу відносно встановлених проектом, що вимагає виконання періодичної оцінки поточного технічного стану труби з метою визначення її придатності до подальшої експлуатації та залишкового ресурсу. Визначальною для працездатності трубопроводу характеристикою технічного стану є його міцність, тобто здатність витримувати проектні навантаження без руйнування.

Завдання з перевірки та забезпечення умов міцності магістральних газопроводів (МГ) дуже часто ускладнюється наявністю обмежених відомостей щодо їх початкового стану та відсутністю актуальних відомостей про його зміни, що сталися протягом експлуатації. Наприклад, ерозія ґрунту в місцях виходу трубопроводу на поверхню, планові та позапланові ремонти елементів повітряного переходу можуть змінити геометричну конфігурацію ділянки МГ, що може суттєво вплинути на схему її навантаження і, як наслідок, призвести до зміни експлуатаційних характеристик (максимально допустимий робочий тиск, коефіцієнт запасу міцності, залишковий ресурс).

У відповідності до вимог СНиП 2.05.06-85 [1] основним проектним розрахунком на міцність надземної ділянки трубопроводу є випадок статичного навантаження внутрішнім тиском. При цьому мають бути враховані можливі додаткові навантаження – температурні, аеродинамічні, власна вага тощо). Слід зазначити, що у даний час в Україні відсутня нормативна база, що регламентує порядок і конкретні математичні процедури виконання розрахунків на міцність МГ, які знаходяться в процесі експлуатації. Виключення становить ВБН ... [2], проте основною метою і змістом зазначеного документа є оцінка впливу дефектів металу магістральних трубопроводів на їх міцність.

Очевидно, що задача достовірної оцінки міцності МГ, які перебувають в процесі тривалої експлуатації є вкрай актуальною.

#### Загальна методологія

В узагальненому вигляді умова (критерій) міцності конструкції (у даному випадку трубопроводу) формулюється наступним чином (див., наприклад, [3]):

$$P \leq [P], \quad (1)$$

де  $P$  – розрахункове значення узагальненого навантаження, як правило, виражене у вигляді комбінації

механічних напружень певних категорій, МПа; [P] – допустиме значення характеристики матеріалу з урахуванням узагальненого коефіцієнту запасу, МПа.

Оскільки, зміни механічних властивостей металу МГ впродовж тривалої експлуатації практично не спостерігаються, основними чинниками, що впливають на міцність труби, є параметри її поточного напружено-деформованого стану (НДС) та наявність дефектів металу.

Вихідними даними для побудови розрахункової моделі повітряного переходу є його проектні геометричні характеристики, умови закріплення та експлуатаційні навантаження. При цьому зазвичай використовують класичні схеми двохопорної балки з різними варіантами закріплення. При такому підході виникає низка проблем, зокрема:

- спостерігається суттєва невідповідність фактичної геометрії трубопроводу даним, встановленим в його проекті;
- моделювання умов закріплення балкового переходу нерухомими недеформованими опорами не відповідає фактичному стану через неврахування нелінійної взаємодії труби з ґрунтом у місцях її виходу з ґрунту та прилеглих зонах;
- недостатньо враховується вплив технології замикання трубопроводу при його будівництві (до уваги береться лише температурний перепад).

де  $\alpha$  – коефіцієнт експоненціального згладжування;  $Q_n$  – вимірне значення курсу РО на  $n$ -ому кроці.

У представленій роботі автором розроблено та застосовано розрахунково-інструментальний метод, що дозволяє підвищити точність та достовірність розрахункових оцінок параметрів НДС трубопроводу за рахунок зменшення впливу вищезазначених чинників. Викладені нижче результати отримані в рамках технічного обстеження МГ Острогозьк-Шебелинка Управління МГ «Харківтрансгаз» (162-й, 165-й км) на ділянках балкових, тобто без проміжних опор, повітряних переходів.

#### Вихідні дані та результати обстежень

Визначення недопустимих деформацій надземних ділянок МГ виконується переважно візуально-оптичним методом неруйнівного контролю (ВОК) та шляхом геодезичного нівелювання. При проведенні технічного обстеження повітряних переходів на ділянках МГ Острогозьк-Шебелинка УМГ «Харківтрансгаз» (162-й, 165-й км) за результатами ВОК недопустимих деформацій трубопроводу не виявлено. Виконання геодезичного нівелювання труби не мало змісту через відсутність будь-яких даних щодо проектного просторового положення зазначених ділянок трубопроводу, а також даних попередніх обстежень, які могли бути взяті за основу для порівняння. Складність в організації полігону з постійних геодезичних реперів додатково ускладнює процес нівелювання, а застосування геодезичного GPS обладнання характеризується неприйнятними похибками вимірювання.

Застосована методологія базується на гіпотезі, згідно з якою просторова геометрія трубопроводу приймається у якості геометричного інваріанту, що дозволяє виконувати геодезичну зйомку у будь-якій локальній системі координат з наступним приведенням до початкового базису. На практиці виконується вимірювання просторових координат верху труби, для яких при відомому зовнішньому діаметрі трубопроводу здійснюється елементарне перетворення в координати його осьової лінії. Для забезпечення достатнього консерватизму крок вимірювання вздовж осі обирається виходячи з передумови не перевищення можливими деформаціями ділянки труби між точками замірів значень загальної похибки геодезичної зйомки.

Проектні характеристики розглянутого МГ представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Паспортні дані повітряних переходів 162-й, 165-й км

1.1	Найменування об'єкту, загальна характеристика	Ділянка газопроводу «Острогозьк-Шебелинка» DN1200 (162, 165 км), балковий без проміжних опор	
1.2	Дата введення в експлуатацію	1982-1984 рр.	
1.3	Робочий тиск, МПа	5,4	
1.4	Робоче середовище	природний газ	
1.5	Відомості щодо розмірів, матеріалів:		
	а) діаметр, мм	1220	
	б) товщина стінки, мм	12,0	
	в) марка сталі	17Г1С-У	
	г) довжина ділянки, м		
		162 км	165 км
	проектна	14,0	23,0
	фактична	38,6	46,9

З урахуванням геометричної однотипності розглянутих повітряних переходів, у якості прикладу на рисунку 1 представлено загальний вигляд переходу на 165-ому км.



Рис. 1. Повітряний перехід МГ Острогозьк-Шебелинка 165-км

Просторова геодезична зйомка виконувалася за допомогою лазерного тахеометра Trimble M3 з роздільною здатністю 5 кутових секунд. З урахуванням відсутності суттєвих відхилень осі труби у горизонтальній площині результати тривимірної зйомки приведені до двовимірного масиву даних та представлено на рисунку 2.

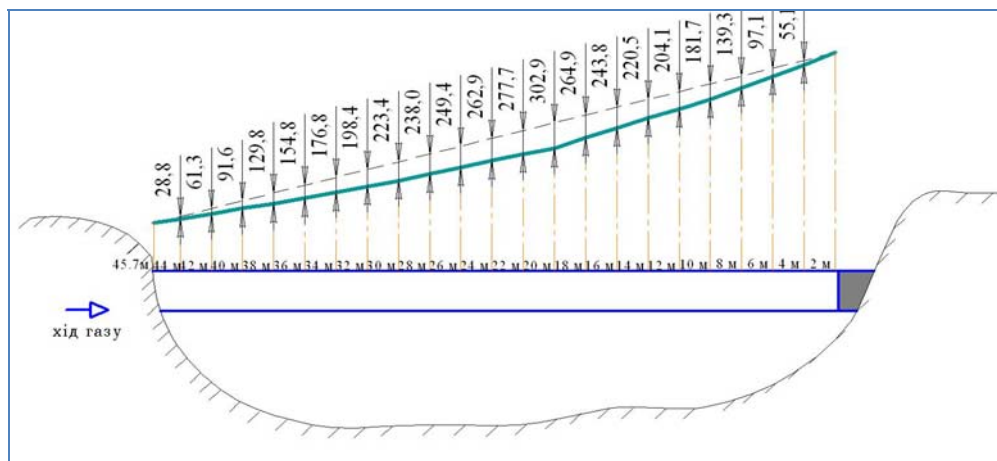


Рис. 2. Результати тривимірної геодезичної зйомки

Результати аналізу фактичної геометрії ділянки повітряного переходу свідчать про наявність аномального прогину труби, значення якого є нереальним для розрахункової схеми у вигляді двохопорної балки, що знаходиться під впливом статичної системи навантажень. Дійсно, згідно з [3] максимальний прогин  $f_A$  визначається наступним чином:

$$f_A = -(5ql^4)/(384EJ) \quad (2)$$

де  $q$  – погонне навантаження від ваги труби та її вмісту, Н/м;  $l$  – проліт труби, м;  $E$  – модуль пружності, Па;  $J$  – момент інерції, м<sup>4</sup>.

Окрім аналітичної оцінки максимально можливого прогину згідно з формулою (2) розрахунок також виконувався за допомогою програмного коду CAESAR II 5.2. Результати розрахунку згідно з обома підходами дали втричі менші значення максимального прогину труби порівняно з фактичними даними, що свідчить про неприйнятність спрощеного підходу щодо побудови розрахункової моделі. Для вирішення проблеми до розрахункового алгоритму було включено дані, які враховують історію навантаження трубопроводу протягом всього життєвого циклу, починаючи з етапу будівництва. Таким чином, при виконанні наступних розрахунків було застосовано реалістичну розрахункову схему, що включає нелінійний характер навантаження труби повітряного переходу до моменту його замикання. В даному випадку спочатку слід розглянути деформацію трубопроводу як консольно защемленого стрижня, що під дією власної ваги має бути опущеним до зустрічної частини трубопроводу в районі виходу з ґрунту на протилежному березі балки безпосередньо перед виконанням замикаючого зварного з'єднання. Згідно з [3] для зазначеної розрахункової схеми максимальний прогин  $f$  визначається на підставі наступного співвідношення:

$$f = -(Pl^3)/(2EJ) \quad (3)$$

де  $P$  – навантаження, еквівалентне розподіленому, з точкою прикладення на кінці стрижня,  $H$ .  
У даному випадку результати аналітичного та комп'ютерного розрахунків дали узгоджені значення максимального прогину, що відповідають реальній геометрії повітряного переходу (близько 300 мм).

На підставі зазначеного вище можна стверджувати про адекватність розрахункової моделі повітряних переходів, що надає можливість виконання уточнених оцінок параметрів НДС, зокрема, діючих механічних напружень, що виникають внаслідок впливу всього комплексу експлуатаційних навантажень. Такі розрахунки було виконано за допомогою вищезгаданого розрахункового коду з урахуванням виявленої геометричної нелінійності конструкції повітряних переходів, та представлено на рисунку 3. Результати розрахунку свідчать про наявність в трубі зон підвищених механічних напружень, які становлять 255 МПа, що всього на 50% нижче границі плинності для сталі 17Г1С-У [4].

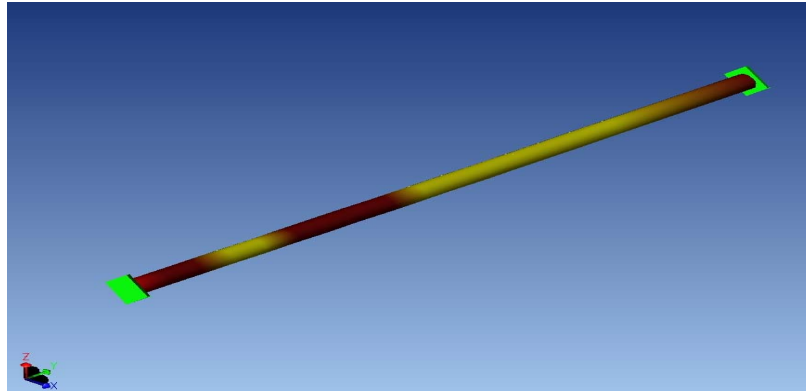


Рис. 3. Розподіл механічних напружень (максимальне значення 255 МПа)

Додатковим підтвердженням коректності та адекватності результатів моделювання напружено-деформованого стану розглянутих ділянок повітряних переходів МГ є дані щодо неруйнівного контролю методом магнітної структуроскопії. Підвищені значення коерцитивної сили 5.9 були зареєстровані в зонах, що співпадають з розрахунковими зонами підвищених напружень. Зазначене свідчать про початок процесів пластичної деформації металу в окремих місцях трубопроводу, що цілком узгоджується з отриманими результатами розрахунку.

### Висновки

Автором розроблено та апробовано в польових умовах розрахунково-інструментальну методику визначення параметрів НДС повітряних переходів МГ в процесі експлуатації на підставі результатів геодезичної зйомки, що дозволяє підвищити достовірність оцінки механічних напружень в трубопроводі та, відповідно, підвищити рівень його безпеки. Висока точність застосованої методології досягнута за рахунок усунення недоліків, притаманних усталеним в Україні підходам. За результатами експериментально-розрахункових досліджень встановлено вимоги щодо прийнятних значень похибки вимірювання геометричних параметрів труби, а також критерій достатності масиву значень просторових координат її осі.

Додатково слід відзначити необхідність врахування історії навантаження трубопроводу протягом всіх етапів його життєвого циклу, починаючи з етапу будівництва.

Методика може бути запропонована для використання при вдосконаленні національної нормативної бази у сфері транспортування природного газу та нафтопродуктів, водопостачання тощо.

### Література

1. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы.
2. ДСТУ-Н-Б-В.2.3-21:2008. Магістральні трубопроводи. Настанова. Визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами.
3. Опір матеріалів / Під ред. Г.С. Писаренка // Київ, Вища школа – 2004 – 655 с.
4. Трещиностойкость сталеы магистральных трубопроводов/ А.Я. Красовский, В.Н. Красико // Киев, Наукова думка — 1990 – 176 с.

### References

1. SNiP 2.05.06. Magistralnye truboprovody.
2. DSTU-N-B-V.2.3-21:2008. Magistralni truboprovody. Nastanova. Vyznachennya zalyshkovoyi mitsnosti magistralnyh truboprovodiv z defectamy.
3. Opir materialiv / pid. red. G.S. Pysarenka // Kyiv, Vyshcha shkola – 2004 - 655 p.
4. Treshchinostoykost staley magistralnyh truboprovodov s defectamy / Kiev, Naukova dumka — 1990 – 176 p.

Рецензія/Peer review : 21.10.2016 p. Надрукована/Printed : 10.11.2016 p.  
Стаття рецензована редакційною колегією