

УДК 528.48

д.т.н., професор Чибіряков В.К.,  
к.т.н., проф. Староверов В.С., Нікітенко К.О.  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## **РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ**

*Розглянуто і проаналізовано загальний порядок визначення напружено-деформованого стану магістральних трубопроводів які знаходяться в складних ґрунтових умовах. Запропоновано рекомендації щодо підвищення точності виконання інженерно-геодезичних робіт в небезпечних геологічних умовах.*

**Ключові слова :** *магістральний газопровід (МГ), напружено-деформований стан (НДС), зсув, прогин трубопроводу.*

**Постановка проблеми.** Однією з найважливіших проблем розвитку газової промисловості є підвищення рівня експлуатаційної надійності магістральних газопроводів (МГ). Під впливом перекачування по них продуктів (газ, нафта), зовнішнього середовища і режиму експлуатації поступово знижується несуча здатність трубопроводів, що неминуче вимагає ремонту дефектних ділянок або перекладу застарілих трубопроводів на новий, більш щадний режим.

Досить великий вік трубопроводів об'єктивно пов'язаний з збільшенням ризику аварій і відмов при експлуатації в разі відсутності ефективної системи їх попередження. Це, в свою чергу, передбачає необхідність розробки і вдосконалення інженерно-геодезичних методів ремонту магістральних трубопроводів.

Тому підвищення надійності і забезпечення безпечного функціонування трубопроводів є актуальною проблемою на етапі їх експлуатації.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є аналіз оцінки визначення напружено-деформованого стану магістральних газопроводів в ґрунтовому масиві, а також визначити максимально допустимі значення прогинів трубопроводів, що дозволить вирішити актуальну наукову проблему моделювання точності геодезичних робіт та прийняття рішень для виробництва ремонтно-будівельних робіт на ділянках МГ в складних природно-кліматичних умовах при проведенні моніторингу на стадії їх експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Переважна більшість магістральних трубопроводів експлуатуються в умовах одночасного впливу механічних навантажень і активних поведінок зовнішніх та внутрішніх середовищ. Причому ці фактори можуть діяти в самих несприятливих співвідношеннях. Такі спільні дії знижують довговічність і межу витривалості матеріалу. Це призводить до значно більш швидкого руйнування металу труб, ніж при дії кожного фактора окремо. Механічні ушкодження є значними концентраторами напружень для трубопроводів.

Ступінь концентрації напружень в металі поблизу цих дефектів визначається їх геометричними розмірами (кут, глибина і радіус у вершини ризику, тріщини, глибина і діаметр вм'ятини і т. д.), взаємне розташування їх на поверхні труби і типом пошкоджень. Вплив механічних пошкоджень на працездатність труби виражається через концентрацію напруг і деформацій [1].

Тому, для оцінки залишкового ресурсу трубопроводів, які тривалий час перебувають в експлуатації, необхідно достовірно визначити напружено-деформований стан магістрального трубопроводу та вдосконалити інженерно-геодезичні методи спостереження за ремонтом магістральних трубопроводів.

Оскільки умови роботи більшості трубопроводів не є неоднаковими за період експлуатації, а саме змінюються обсяги перекачування продукту, змінюється максимальний робочий тиск, виникають перепади тиску (амплітуди і число циклів зміни тиску) число відключень однієї або декількох насосних установок, кількість відмов, що в свою чергу викликають небезпечні напруження в трубі, і як наслідок повну зупинку роботи трубопроводів.

Для розрахунку точності інженерно-геодезичних робіт, від введення в експлуатацію до контролю технічного стану трубопроводу, розглянемо допустимі навантаження, які відповідають межі пружності трубопроводу. Ці напруги в трубопроводі, що виникли від зовнішніх впливів, можна розрахувати за формулами [2]:

1. Поздовжня напруга - частка повного поздовжнього зусилля  $N$ , яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу трубопроводу:

$$\sigma_{\text{поздов}} = \frac{N}{F} \quad (1)$$

де  $F$  - площа поперечного перерізу матеріалу труби, що залежить від діаметра і товщини стінки.

Але, правильне визначення поздовжнього зусилля  $N$  підземного трубопроводу в будь-який момент може бути виконано тільки з урахуванням поздовжніх переміщень.

2. Кільцева напруга - зусилля, що діють в тангенціальному напрямку, називають кільцевими, і відповідно напругу також.

Розглянемо (Рис.1) напружений стан прямолінійного трубопроводу, що знаходиться під впливом внутрішнього тиску  $p$  і температурного перепаду  $\Delta t$ , для визначення  $\sigma_{ки.}$  кільцевих напружень.

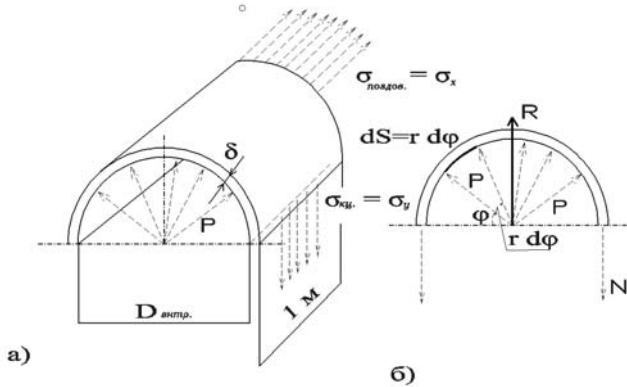


Рис.1. Схема до розрахунку кільцевих напружень.

З схеми видно, що від внутрішнього тиску  $p$  в стінці труби одиничної довжини виникає напруження  $\sigma_{\tau}$  (Рис.1, а), яке можна визначити з умови рівноваги:

$$p \cdot D_{внтр.} = 2 \cdot \sigma_{\tau} \tag{2}$$

Враховуючи, що  $\sigma_{\tau} = \sigma_{ки.} \cdot \delta$ , де  $\delta$  товщина стінки труби.

Виходячи з схеми (Рис.1, б)  $R$  - рівнодіючу внутрішнього тиску на половину труби довжиною 1 м можна знайти розв'язавши інтегральне рівняння:

$$R = \sum \text{Проекц.} Y = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} p \cdot dS \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = 2 \cdot p \cdot \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cdot r d\varphi = 2 \cdot p \cdot r \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cdot r d\varphi = 2 \cdot p \cdot r \cdot (-\cos) \Big|_0^{\pi/2} = 2 \cdot p \cdot r \cdot (-\cos \frac{\pi}{2} + \cos 0) = 2 \cdot p \cdot r \cdot 1 \text{ м} \tag{3}$$

Одиниці виміру :

$$[R] = \left[ 2 \cdot \frac{H}{M^2} \cdot M^2 \right] = [H]$$

Проекція на вісь Y :

$$\sum Y = R - 2 \cdot \sigma_{\tau} \cdot \delta \cdot 1 \text{ м} = 0 \tag{4}$$

Отже, формулу (2) можна записати у вигляді:

$$\sigma_{ки.} = \sigma_{\tau} = \frac{R}{2 \cdot \delta} = \frac{2 \cdot p \cdot r}{2 \cdot \delta} = \frac{p \cdot r}{\delta} = \frac{p \cdot D_{внтр.}}{2 \cdot \delta} \tag{5}$$

де  $p$  - внутрішній тиск у трубопроводі (МПа),  $\delta$  - товщина стінки труби (м),  $D_{внтр.}$  - внутрішній діаметр трубопроводу (м).

Виходячи з залежності між поздовжніми і поперечними напругами, визначимо частину поздовжніх напружень в стінці труби, обумовлених внутрішнім тиском, тобто кільцевими напруженнями:

$$\sigma_{\text{повзд.}} = \frac{p \cdot D_{\text{внтр.}} \cdot \mu}{2 \cdot \delta} = \mu \cdot \sigma_{\text{кл.}} \quad (6)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт поперечної деформації.

Максимальні сумарні поздовжні напруги визначаються від усіх (з урахуванням їх поєднання) нормативних навантажень і впливів з урахуванням поперечних і поздовжніх переміщень трубопроводу у відповідності з методами будівельної механіки [2,3].

Тобто, для повного визначення деформаційних напружень з умов теорії визначення міцності трубопроводу, будемо мати:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{кл.}}^2 + \sigma_{\text{повзд.}}^2} - \sigma_{\text{кл.}} \cdot \sigma_{\text{повзд.}} \quad (7)$$

За формулами (5), (6) і (7) було отримано допустимі напруження  $\sigma$  магістральних газопроводів зовнішнім діаметром згідно ГОСТ 20295-85 на ділянку довжиною 100 м, які приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Допустимі напруження магістральних газопроводів зовнішнім діаметром 530-1420 мм

$D_{\text{внтр.}}$ - внутрішній діаметр трубопроводу, мм	1420	1220	1020	820	720	530
$\delta$ - товщина стінки труби, мм	18,7	14	12	10	10	8
$p$ - внутрішній тиск газу, МПа	7,5	5,5	5,5	3,5	3,5	3,5
$\mu$ - коефіцієнт Пуассона для сталі	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
$\sigma_{\text{кл.}}$ - кільцеве напруження, МПа	284,759	239,643	233,750	143,500	126,000	115,938
$\sigma_{\text{повзд.}}$ - поздовжнє напруження, МПа	79,733	67,100	65,450	40,180	35,280	32,463
$\sigma$ - повне деформаційне напруження, МПа	254,441	214,129	208,863	128,222	112,585	103,594

Враховуючи узагальнений запис закону Гука через напруження і відносні деформації дає можливість виключити вплив конструктивних особливостей трубопроводу на вид залежності між силовим параметром і деформацією. Для випадку лінійного навантаження закон Гука в прямій формі має вигляд:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \mu \cdot \sigma_y) \text{ деформация розтягування,} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \mu \cdot \sigma_x) \text{ деформация зсуву}\end{aligned}\quad (8)$$

де  $\sigma_x$  - поздовжнє напруження;  $\sigma_y$  - кільцеве напруження;  $E$  - модуль Юнга,  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона.

Отримані рівняння (8) дають можливість визначити гранично допустимі деформації, якщо відомі напруги. Проаналізувавши формули можна сказати, що навантаження і впливи, що впливають на напружено-деформований стан трубопроводу, залежать від міцнісних характеристик матеріалу трубопроводу і його геометричного розміру. Але для реальної розрахункової картини напружено-деформованого стану підземних ділянок трубопроводів можна отримати лише з урахуванням опору оточуючого їх ґрунту [4].

Геодезичний моніторинг магістральних трубопроводів є необхідною умовою їх працездатності. Але адекватні геодезичні вишукування неможливі без хоча б наближеної оцінки рівня його напружено-деформованого стану.

Для забезпечення систематичних геодезичних спостережень за деформацією трубопроводу створюється планово-висотна локальна геодезична мережа і забезпечується необхідна точність геодезичних робіт при інженерних вишукуваннях. Методика геодезичних спостережень визначається з врахуванням досліджуваної ділянки місцевості, а саме водних перешкод, швидкості зсуву, рельєфу та інших факторів. При дослідженні деформацій трубопроводів використовується планова геодезична основа, створена при виконанні топографо-маркшейдерської зйомки, точність яких повинна забезпечувати полігонометрію 2 розряду.

Висотною геодезичною основою служить нівелірний хід III класа, прокладений по пунктах планової геодезичної основи. Геодезична прив'язка трубопроводу до пунктів планово-висотної основи проводиться традиційними методами [5].

Після дослідження динаміки деформацій трубопроводу необхідно визначити стрілки прогину трубопроводу, що дозволить перейти до визначення необхідної точності геодезичних вимірів в залежності від стану і напружень трубопроводу.

**Висновок.** В даний час актуальним завданням є геодезичний контроль технічного стану трубопроводів; пошук місця і розмірів дефектів і пошкоджень; прогнозування технічного стану трубопроводів. Геодезичний контроль дозволяє встановити необхідний порядок організації обстеження, основні роботи, що виконуються при обстеженні і виконати розрахунок залишкового ресурсу ділянок трубопроводу.

Отримані в результаті такого рішення дані дозволяють обґрунтовано вибрати місця розташування контрольних марок та визначити необхідну точність вимірювань і судити про стан будівельної конструкції і споруди в цілому на момент вимірювань.

### Література

1. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов. - Москва "НЕДРА".1977. – 401 с.
2. СНиП 2.04.12-86. Расчет на прочность стальных трубопроводов.
3. СНиП 2.05.06-85\*. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы.
4. Рудаченко А.В. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов. - Томск: Из-во Томского политехнического университета. 2011. – 136 с.
5. Субботин И.Е. Инженерно-геодезические работы при проектировании, строительстве и эксплуатации магистральных нефте-газопроводов. - Москва. 1986. – 136 с.

### Анотация

Рассмотрены и проанализированы существующие методы влияния геологических процессов на магистральные трубопроводы и методы расчета точности геодезических работ при проведении мониторинга линейных сооружений находящихся в сложных грунтовых условиях. Предложены рекомендации относительно повышения точности выполнения геодезических работ в опасных геологических условиях.

### Annotation

Reviewed and analysed the existing methods of geological processes impact on the pipelines and methods of calculation precision of geodetic work during the monitoring of linear structures. Proposed recommendations for improving the accuracy of geodetic work in hazardous geological conditions.