

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

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ.

Розглянуто і проаналізовано загальний порядок визначення напружено-деформованого стану магістральних газопроводів які знаходяться в складних ґрунтових умовах. Запропоновано рекомендації щодо обґрунтування точності виконання інженерно-геодезичних робіт при проведенні моніторингу газопроводів на стадії їх експлуатації.

Ключові слова: газотранспортна система (ГТС), магістральний газопровід (МГ), напружено-деформований стан (НДС), прогин газопроводу.

Постановка проблеми. Газотранспортна система (ГТС) України – одна з найбільших у світі – виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу через територію України в країни Західної та Центральної Європи. Основними транзитними напрямками газотранспортної системи України є і залишатимуться магістральні газопроводи “Союз”, Уренгой – Помари – Ужгород, “Прогрес” та система газопроводів Слєць-Кременчук – Ананьїв – Ізмаїл.

Ці магістралі є джерелами підвищеної небезпеки, як з точки зору екології, так і можливого створення надзвичайної ситуації при виникненні аварій на газопроводах.

Вартість модернізації та реконструкції ГТС України є набагато дешевшою, ніж будівництво нових газомагістралей. Тому актуальним завданням є геодезичний контроль технічного стану параметрів газотранспортної системи України на сучасному світовому рівні.

Визначення ступеня небезпеки зсувних ділянок газопроводу, визначення їх розмірів, механізм проявів, а також особливості НДС газопроводів в нестандартних умовах роботи дозволяють дослідити їх спільну деформацію «ґрунт - газопровід», що передбачає підвищення точності виконання інженерно-геодезичних робіт.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз оцінки визначення напружено-деформованого стану на ділянках магістрального газопроводу «Уренгой — Помари — Ужгород» (УПУ) в ґрунтовому масиві. Визначити максимально допустимі значення прогинів трубопроводів, що

дозволить вирішити актуальну наукову проблему моделювання точності геодезичних робіт.

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб проводити геодезичний моніторинг необхідно мати уяву про хоча б наближений рівень та характер НДС. Саме з цього можна визначити необхідну точність геодезичних досліджень та взагалі їх оптимальну технологію.

Для встановлення функціональних зв'язків між величинами деформацій та властивостями ґрунтового масиву необхідно врахувати всі навантаження і впливи на магістральний газопровід [1].

В будівельній механіці для оцінки НДС магістрального газопроводу починається з застосування найпростішої розрахункової моделі, якою може бути модель балки при згині. Тут НДС газопроводу описується одновимірним напружено-деформованим станом балки, тобто одновимірною системою, яка є прямою що співпадає з поздовжньою віссю трубопроводу.

Вплив ґрунта, що знаходиться нижче трубопроводу враховується за гіпотезою Фусса-Вінклера, як сукупність пружних стержнів.

Моделлю вінклеровської основи може служити ряд пружин однакової жорсткості, що спираються на абсолютно жорстку основу і діють незалежно одна від іншої. Друге припущення теорії: пружна основа однаково працює на стиск і на розтяг[2].

Відповідно до гіпотези Фусса-Вінклера, реакція пружної основи в кожній точці пропорційна прогину балки. Диференціальне рівняння пружної лінії балки має вигляд:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = q \quad (1)$$

де EI - жорсткість балки; q - навантаження; величина $k = k_0 \cdot h_{сл}$ називається погонним коефіцієнтом постелі.

Коефіцієнт постелі визначається за усередненими значеннями модуля деформації і коефіцієнта Пуассона ґрунта:

$$k_0 = \frac{E_{гр}}{H_c(1 - 2m_{гр}^2)} \quad (2)$$

де $E_{гр}$ - модуль деформації; $m_{гр}$ - коефіцієнт Пуассона; H_c - глибина стислої товщи.

Навантаження і дії, пов'язані з вигином осі газопроводу (тиск і реакція ґрунту) повинні визначатися згідно СНіП 2.05.06-85 * [3] на підставі аналізу ґрунтових умов і їх можливої зміни в процесі експлуатації.

Розрахунковою математичною моделлю газопроводу є система звичайних диференціальних рівнянь, розрахункові функції яких повинні

задовольняти певним граничним умовам, які впливають з умов закріплення газопроводу.

Використання досить простої в той же час достатньо адекватної розрахункової моделі магістрального газопроводу дає змогу орієнтуватися в рівні його напружено-деформованого стану, що необхідно для визначення оптимальної точності геодезичного моніторингу.

Дослідження прогину газопроводу дає можливість перейти до моделювання деформації газопроводу, на основі якої може бути обґрунтована точність геодезичних спостережень за деформаціями і обґрунтувати точність виконання геодезичних робіт.

Приклад розрахунку визначення прогину газопроводу «УПУ» з моделюванням зміни товщини шару ґрунту над газопроводом та приблизна структура аналізу результатів, наведені в табл.1,2 та на рис.1,2.

Для розрахунку були використані такі дані:

- довжина прольоту ділянки газопроводу $l=50\text{м}$,
- довжина прилеглих ділянок $\frac{a-l}{2}=17,5\text{м}$,
- відстань від осі трубопроводу до верху засипки $h_{\text{сл}}=5\text{м}$,
- газопровід УПУ виконаний з труб діаметром $D=1,42\text{м}$ та товщиною стінки $\delta=0,018\text{м}$; метал труби - сталь $E=2,10 \cdot 10^8 \text{кПа}$,
- питома вага ґрунту, який складається з суглинку легкого пілуватого твердого та напівтвердого становить $\gamma=19,4 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$.

У розрахунках вертикальна складова навантаження на одиницю довжини трубопроводу становить $q = 1,42\text{м} \cdot 19,4 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} = 27,548 \frac{\text{кН}}{\text{м пог}}$. Розрахунки виконані для 21-ї точки.

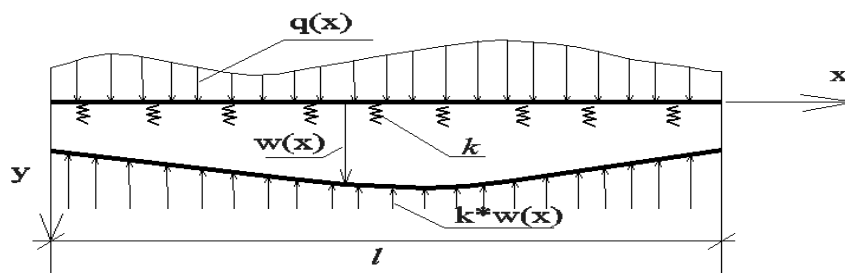


Рис.1. Перша розрахункова модель магістрального газопроводу.

Тут $q(x)$ – зовнішня навантаження; k – коефіцієнт постелі ґрунту; l – розрахункова довжина ділянки газопроводу; h – шар ґрунту; w – прогин газопроводу.

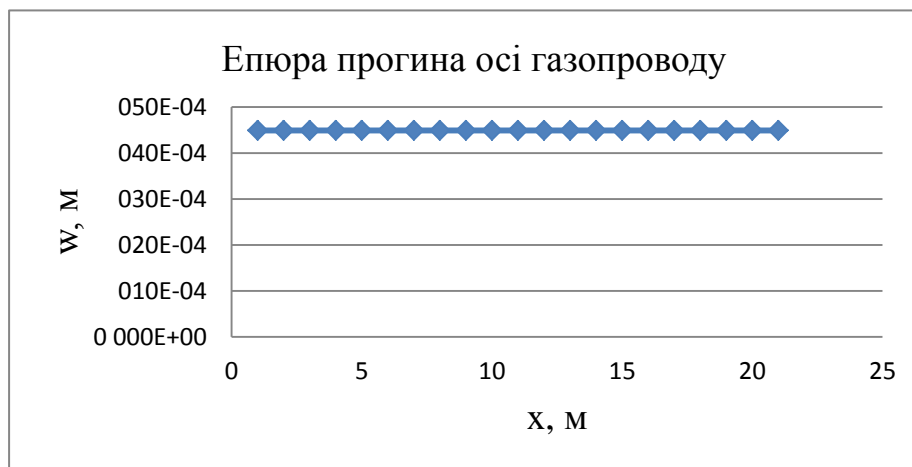
Це найпростіша розрахункова модель магістрального газопроводу, оскільки вона задана такими граничними умовами: $N=0$, $Q=0$, $M=0$ – якщо кінці ні як не закріплені.

В результаті розрахунку отримаємо такі величини табл.1:

- вертикальне переміщення $w(x)$;
- горизонтальне переміщення $U(x)$ (при врахуванні зсуву);
- кути повороту перерізів $\varphi(x)$;
- нормальна сила $N(x)$;
- перерізуюча сила $Q(x)$;
- згинальний момент $M(x)$.

Таблиця 1.

| Кількість точок | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Горизонтальне переміщення | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Прогин 10^{-3} | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,49 | 4,4 | 4,49 |
| Кут повороту 10^{-19} | -1,45 | -1,56 | 0,000 | 1,11 | 0,000 | -7,29 | 2,22 | 6,11 | 4,45 | 2,78 |
| Нормальна сила | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Перерізуюча сила 10^{-14} | 0,000 | 5,68 | 2,84 | 0,000 | 1,71 | 1,99 | -2,84 | 0,000 | -1,14 | -5,68 |
| Згинаючий момент 10^{-12} | 0,000 | 7,11 | 1,14 | 1,14 | 4,55 | 1,25 | 1,48 | 1,36 | 1,14 | 5,68 |



Функція прогину і її похідні повністю описують напружено-деформований стан газопроводу, що знаходиться в ґрунтовому масиві [4]. За допомогою графіків епюр легко проглядаються проміжки зростання та спадання функцій прогинів, точки локального максимуму і мінімуму, а також інтервали опуклості і угнутості графіків цих функцій.

З першої побудованої епюри прогину видно, що на газопровід діє лише зовнішній шар ґрунту та його власна вага. Тому при таких даних газопровід просяде на 0,5см.

Вертикальне переміщення $w(x)$ та згинальний момент $M(x)$ є необхідними величинами для переходу до моделювання деформації газопроводу. Тому надалі будемо відображати лише епюри цих величин.

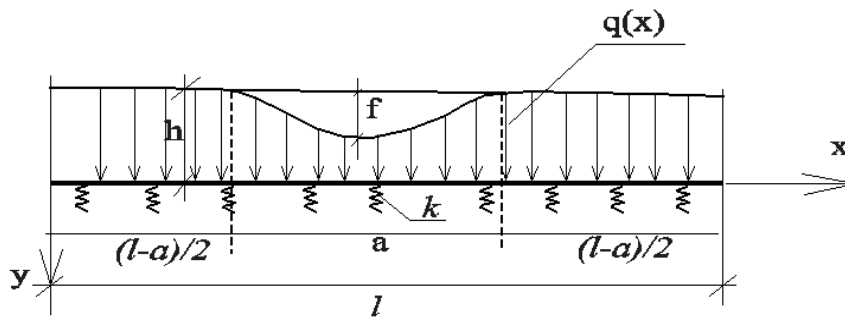
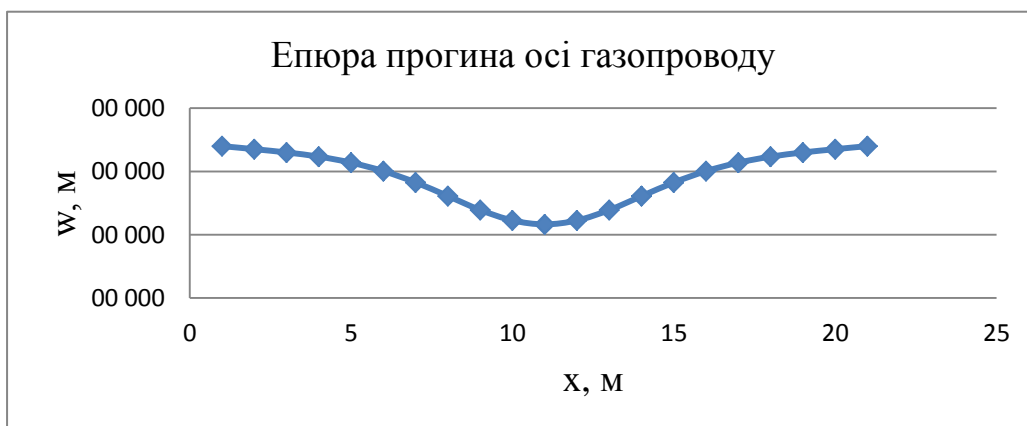


Рис.2. Друга розрахункова модель магістрального газопроводу.

Тут f – зміна висоти шару ґрунту.

Таблиця 2.

| Кількість точок | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Горизонтальне переміщення | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Прогин | 0,024 | 0,023 | 0,023 | 0,022 | 0,021 | 0,020 | 0,018 | 0,016 | 0,013 | 0,012 |
| Кут повороту 10^{-4} | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,4 | -0,6 | -0,8 | -0,9 | -0,8 | -0,5 |
| Нормальна сила | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Перерізна сила | 0,000 | 20,01 | 32,5 | 36,06 | 27,45 | 1,456 | -48,58 | -129,2 | -162 | -102,7 |
| Згинаючий момент | 0,000 | 26,53 | 93,84 | 181,70 | 264,1 | 304,5 | 251,3 | 36,03 | -352,9 | -697,6 |



З другої побудованої епюри прогину видно, що при заданих граничних умовах ($U=0$, $w=0$, $\varphi=0$ – якщо даний кінець жорстко защемлений) оцінювання впливу ґрунту на характеристики НДС газопроводу, можна зробити висновок про те, що залежність між вертикальною складовою загрузки та максимальними згинальними напруженнями не є пропорційними. А також зрівнювання величин прогину газопроводу зі-з зміною висоти шару ґрунту, в розглянутому випадку, напруження на зсувній ділянці значно перевершує напруження в прилеглих ділянках газопроводу. Отже, вони визначають міцність газопроводу при згині.

На підставі проведених розрахунків та аналізу графіків можна зробити наступний висновок:

1. При незначних розмірах провалу і висоти засипки ґрунту над трубою характеристики напружено-деформованого стану газопроводу можна знайти з рішення задачі в лінійній постановці.

2. Кінці труби, що знаходиться в ґрунті, просідають пропорційно власній вазі труби з газом, вазі ґрунту над трубою. Глибина просадки може бути оцінена за значенням коефіцієнта постелі для даного типу ґрунту.

3. Джерелом максимальних напружень є не власна вага труби, а її защемлення в ґрунті.

Така методологія дозволяє прогнозувати вплив небезпечних геологічних процесів на газопровід і дозволяє розробити рекомендації та обґрунтувати точність виконання геодезичних робіт, тобто моделювання точності на такому рівні, який забезпечує фіксацію деформацій конструкції та ґрунтового масиву.

Враховуючи сказане вище, можна запропонувати наступні рекомендації з організації геодезичних спостережень за напружено-деформованим станом магістральних газопроводів в ґрунтовій основі:

1. Якщо в процесі рекогностування траси газопроводу будуть виявлені ділянки з рухом ґрунту, то на цих ділянках потрібно встановити постійні станції спостереження, які розташовані в зоні без впливу переміщень ґрунту.

2. У разі значних ґрунтових зрушень перед початком детальних досліджень необхідно попередньо закріпити ряд контрольних марок в місцях прояву НДС газопроводу.

3. Для виконання спостережень за деформаціями створювати планово-висотну локальну геодезичну мережу. Схема і точність геодезичної мережі та методика спостережень визначаються розміром досліджуваної ділянки, протяжністю небезпечної ділянки в деформаційному відношенні. При дослідженні деформацій газопроводів необхідно створення планової

геодезичної основи, точність якої визначається на основі напружено-деформованого стану.

Висновок. Оцінка напружено-деформованого стану магістральних газопроводів з використанням методів фізичного та математичного моделювання з наступним рішенням крайових задач дозволяють визначити місця максимально допустимих напружень, а також для кожної ділянки газопроводу визначити можливі характеристики деформацій. Отримані в результаті такого рішення дані дозволяють обґрунтовано вибрати місця розташування контрольних марок і визначити необхідну точність вимірювань і судити про стан будівельної конструкції та споруди в цілому на момент спостережень.

Література

1. Рудаченко А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. - 136с.
2. Антанович П.Б. К расчету балок и плит, опирающихся на упругое основание. Известия Томского политехнического института имени С.М.Кирова/Том 76/.1954
3. СНиП 2.05.06-85*. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы. Министерство регионального развития Российской Федерации. Москва. 2012.
4. Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков, В.А. Чичелов, Р.А. Фазлетдинов. Расчет напряженно-деформированного состояния и прочности газопровода, проходящего по карстовой территории. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999 – 74с.

Аннотация

Рассмотрено и проанализировано общий порядок определения напряженно-деформированного состояния магистральных газопроводов находящихся в сложных грунтовых условиях. Предложены рекомендации по обоснованию точности выполнения инженерно-геодезических работ при проведении мониторинга газопроводов на стадии их эксплуатации.

Annotation

Reviewed and analyzed in a general procedure for determining the stress-strain state of the main gas pipelines in difficult ground conditions. Recommendations were provided to substantiate the accuracy of the engineering and geodetic work for monitoring pipelines on the stage of their operation.