

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПОЛОЖЕНЬ ВИСЯЧОГО ТРУБОПРОВОДУ З УТРИМУЮЧЕМ КАНАТОМ

Ріпецький Євгеній^{1}, Непеляк Олег¹, Ріпецький Роман²*

¹ Кафедра геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна, *e-mail: vevhenii.ripetskvi@nuing.edu.ua

² Кафедра фізико-математичних наук, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Анотація. Розроблено технологічну схему контролю положень висячих трубопроводів із утримуючим канатом на основі знімків, отриманих із безпілотних літальних апаратів. Для підвищення точності фотограмметричного знімання обрано оптимальний ракурс зйомки трубопроводу шляхом варіювання двома параметрами – відстані до об'єктів та висотою розміщення камери. Досягнуто зменшення розсіювання середньоквадратичної похибки знімка в межах 2,10 – 2,44 мм.

Ключові слова: геодезичний моніторинг, висячий трубопровід, фотограмметрія, несучий канат, точність вимірювань, середньоквадратична похибка, аерофотознімки.

Актуальність теми дослідження

До трубопровідних систем надземних переходів висуваються вимоги максимальної надійності, мінімальної металоємності та екологічної безпеки. Ці показники залежать як від якості проектування, так і від обслуговування в ході якого методами діагностики здійснюється оцінка технічного стану для прогнозування їх довговічності. Технологічний прогрес сформував методи та інструменти, здатні забезпечити моніторинг конструкцій з високою точністю (Чубін, 2025).

Важливим показником контролю конструкцій надземних переходів є деформації трубопроводу у просторі (Запыхляк, та ін. 2024). Величини прогинів реєструються технологіями геодезичним моніторингом із широким застосуванням електронних тахеометрів, лазерного сканування (LiDAR) та супутникових систем (GPS/GNSS) (Тревого, та ін. 2022). За їх значеннями розрахунковими методами визначають напружено-деформований стан (НДС) газопроводів (Чибіряков, та ін. 2016).

За аналогією з висячими мостами до трубопроводів може бути застосовано розрахунок за "існуючою схемою", який передбачає отримання зображень конструкції в різні часові періоди (Grigoreva, 2021). Початкові координати визначаються геодезичними методами, а наступні – як відхилення від початкового стану.

Конструкції висячих переходів є більш складніші ніж балкові. Їх ознакою є несучий канат, що потребує особливого підходу до моніторингу (Коробков, та ін. 2025). Тому технологією геодезичного моніторингу обрано аерофотознімання з БПЛА з наступною фотограмметричною обробкою аерофотознімків. При певних умовах точність зображень положень висячого трубопроводу з утримуючим канатом може бути досягнута за середньоквадратичним до значень $m_x=m_y=m_z=2\div3,5$ мм (Іванчук, та ін. 2023).

Отже, обґрунтування технології геодезичного моніторингу відкритих ділянок висячих трубопроводів з метою визначення реального НДС є актуальним науково-практичним завданням, що потребує нових підходів і інноваційних рішень.

Методика

Теоретичною базою методології досліджень слугувало положення про розподіл СКВ на фотограмметричному зображенні, що отримується БПЛА (Дорожинський, та ін. 2008). Технологічну схему знімання показано в умовній системі координат, яка орієнтується таким чином, щоб трубопровід – 1 і канат – 2 були в площині $\{OXZ\}$. Камера розміщується в площині, перпендикулярній до $\{OXZ\}$, у точці C (рис. 1).

Так як у висячих конструкціях довжина канату L перевищує довжину трубопроводу l ($L > l$), то його положення у просторі описується геометрією вагової нитки, яка впливає на силове навантаження. Тому в кадрі зображення мають бути як трубопровід, так і несучий канат зі своєю геометрією провисання.

Спостереження за характерними точками здійснюється з точки C під кутом α до горизонталі. При α_1 фіксується трубопровід, при α_2 – вузлові точки t_1, t_2, t_3 тощо на канаті. Камера займає своє положення в точках C_1, C_2 на відстані d , забезпечуючи потрібний ракурс для одночасної фіксації обох об'єктів. Якщо трубопровід знімається під кутом $\alpha_1=0$, то крайні вузлові точки несучого канату A і B будуть видимі під кутом $\alpha_2=50,2^\circ$.

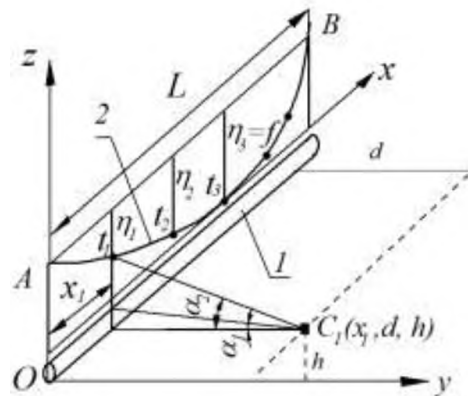


Рисунок 1. Технологічна схема фотограмметричного знімання положень висячого трубопроводу з утримуючим канатом.

Збільшення кута α підвищує СКВ через виражені перспективні ефекти та геометричні спотворення. Точність вимірювання η_i досягається шляхом вибору оптимального ракурсу зйомки, за якого значення СКВ для трубопроводу і канату є мінімальними.

Виклад основного матеріалу

Підвищення точності периферійної області знімку, де відображено канат, здійснювалося пошуком оптимального ракурсу шляхом варіювання параметрами розміщення камери: відстані польоту d від трубопроводу та висоти знімання h . Тому координати точки знімання записуються у вигляді $C(x_1, d, h)$.

Так, у варіанті 1 (базовому) трубопровід спостерігався під кутом $\alpha_1=0$, в той час кути спостереження канату знаходилися в діапазоні його крайніх точок $\alpha_2=8 - 50,2^\circ$. Розсіювання СКВ становило 2,10 – 3,28 мм (табл.1).

Варіанти 2 і 3 були проміжними та спрямованими на підвищення точності визначення координат верхньої точки канату. У варіанті 2 висоту камери збільшено до $h = 3$ м, у варіанті 3 – відстань до трубопроводу до $d = 15$ м. Розрахунки показали, що збільшення відстані (варіант 3) є ефективнішим. При цьому максимальний кут спостереження зменшився до $\alpha_2 = 42^\circ$, а розсіювання СКВ – до 2,10 – 2,68 мм.

Таблиця 1. Значення СКВ (мм) при варіюванні параметрами відстані до трубопроводу d і висоти польоту h

	Відстань d	Висота h	№ точки (вузла)				
			A	t_1	t_2	t_3	трубопровід
Варіант - 1	10	0	3,28	2,49	2,20	2,14	2,10
Варіант – 2	10	3	2,82	2,22	2,10	2,11	2,19
Варіант – 3	15	0	2,68	2,28	2,14	2,11	2,10
Варіант – 4	15	3	2,44	2,15	2,10	2,10	2,14

Варіант 4 (оптимальний) – логічне продовження попередніх. Параметри: відстань до трубопроводу $d = 15$ м, висота камери $h = 3$ м. Такий ракурс забезпечує мінімальне СКВ для канату при незначному зниженні точності для трубопроводу. Діапазон розсіювання становив 2,14–2,44 мм.

Висновки

Запропоновано методику геодезичного моніторингу, що забезпечує необхідну точність для аналізу деформацій висячих трубопроводів. Оптимізація параметрів розміщення реєструючої камери дозволила визначити ракурс зйомки, при якому досягнуто баланс в похибках вимірювань між деформаціями трубопроводу і переміщеннями точок несучого каната. Досягнуто зменшення розсіювання середньоквадратичної похибки знімка в межах 2,10 – 2,44 мм.

Перелік літературних джерел

- Grigorjeva T. Paeglitis A. (2021). The simplified analysis of the asymmetric single-pylon suspension bridge with rigid cables. *Engineering Structures and Technologies*. 12(2).61-66. DOI: <https://doi.org/10.3846/est.2020.13737>
- Дорожинський О.Л., Тукай Р. (2008). Фотограмметрія: Підручник. –Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 332 с.
- Іванчук О., Ріпецький Є., Коробков О. (2023). Можливості цифрового знімання відкритих ділянок трубопроводів з БПЛА для визначення деформацій (прогинів). *Міжнародна науково-технічна конференція «ГЕОФОРУМ-2023»*. 15-16. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2023/04/ТЕЗИ_ГЕОФОРУМ_2023
- Запущляк В.Б., Мельниченко Ю.Г., Грудз В.Я., Побережний Л.Я., Дорошенко Я.В. (2020). Аналіз напружено-деформованого стану трубопроводів під час підсаджування. *Нафтогазова енергетика*. 2(34). С. 56-66. DOI: [10.31471/1993-9868-2020-2\(34\)-56-66](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2020-2(34)-56-66)
- Коробков О. Ю., Ріпецький Є. Й., Ріпецький Р. Й.(2022). Особливості визначення напружено-деформованого стану висячих газопроводів з урахуванням похибок геодезичних вимірів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. № 1(82). С. 52-60. DOI: [10.31471/1993-9973-2022-1\(82\)-52-60](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2022-1(82)-52-60)
- Чибіряков В.К., Староверов В.С., Нікітенко К.О. (2016). Загальний підхід до моделювання напружено-деформованого стану магістрального газопроводу для визначення геодезичної точності вимірювання. *Інженерна геодезія*, Вип. 63. 14–19. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ig_2016_63_4
- Чубін А.І. (2025). Розробка і впровадження систем моніторингу технічного стану будівель та інфраструктурних об'єктів для своєчасного виявлення дефектів і прогнозування їхнього розвитку. *Комунальне господарство міст*. том 3, випуск 191. 305-313. DOI: [10.33042/2522-1809-2025-3-191-305-313](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-305-313)