



УДК 528.48

MONITORING OF DEFORMATIONS IN AN ABOVE-GROUND GAS PIPELINE USING 3D SCANNING

МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-СКАНУВАННЯ

Romaniuk V.V. / Романюк В.В.*c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4429-1930>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,**Ivano-Frankivsk, Carpatian, 15, 76019**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,**м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 76019*

Анотація. У статті представлено результати просторового моніторингу технічного стану газотранспортної системи України з використанням сучасних геодезичних технологій, зокрема наземного лазерного 3D-сканування. Дослідження проведено на прикладі надземного переходу магістрального газопроводу через водну перешкоду, який складається з чотирнадцяти опор. За допомогою сканера LeicaScanStation P40 отримано високоточну хмару точок, що відображає фактичну геометрію трубопроводу. Застосовано BIM-моделювання у середовищі Autodesk Revit для створення просторової моделі та аналізу деформацій. Проведено зіставлення фактичної та проектної осі трубопроводу у вертикальній і горизонтальній площинах, що дозволило виявити характерні прогини та зміщення. За результатами діагностики встановлено, що технічний стан конструкції задовільний, усі деформації перебувають у межах допустимих значень. Запропонований підхід підтвердив ефективність 3D-сканування як інструменту високоточної діагностики об'єктів критичної інфраструктури в умовах техногенних та воєнних викликів.

Ключові слова: газотранспортна система, моніторинг трубопроводів, 3D-сканування, GNSS, просторовий аналіз, технічна діагностика, критична інфраструктура.

Вступ.

Газотранспортна система (ГТС) України історично виконувала роль головного транзитного коридору для постачання російського природного газу до Європейського Союзу. Упродовж 2000-х років обсяги транзиту сягали понад 140 млрд м³ щороку. Однак із початком повномасштабної війни Росії проти України та змінами на ринку ЄС, транзит був фактично припинений у 2025 році. Попри це, ГТС зберегла свою функціональність завдяки технічній адаптації, модернізації компресорних станцій та розвитку реверсних потоків з країн ЄС. У стратегічному вимірі газотранспортна система залишається критичним компонентом енергетичної, економічної та національної безпеки України.



Нові виклики, зокрема фізичне зношення трубопроводів, техногенні ризики та збройна агресія, актуалізують необхідність постійного моніторингу стану інфраструктури. Важливу роль у цьому відіграють сучасні геодезичні, дистанційні та автоматизовані методи, які дозволяють виявляти деформації, витоки та інші дефекти на ранніх стадіях. Актуальність цього дослідження також визначається перспективою включення ГТС України до транс'європейської водневої інфраструктури, що відкриває нові горизонти для її функціонального переосмислення та модернізації [3].

Постановка проблеми

Газотранспортна система України (ГТС) є однією з найбільших і найважливіших інфраструктурних мереж у Європі, яка забезпечує транспортування природного газу для внутрішнього споживання, а також експорту й імпорту з країнами Європейського Союзу. З понад 38 000 км магістральних і розподільних газопроводів (рисунк 1)[6].

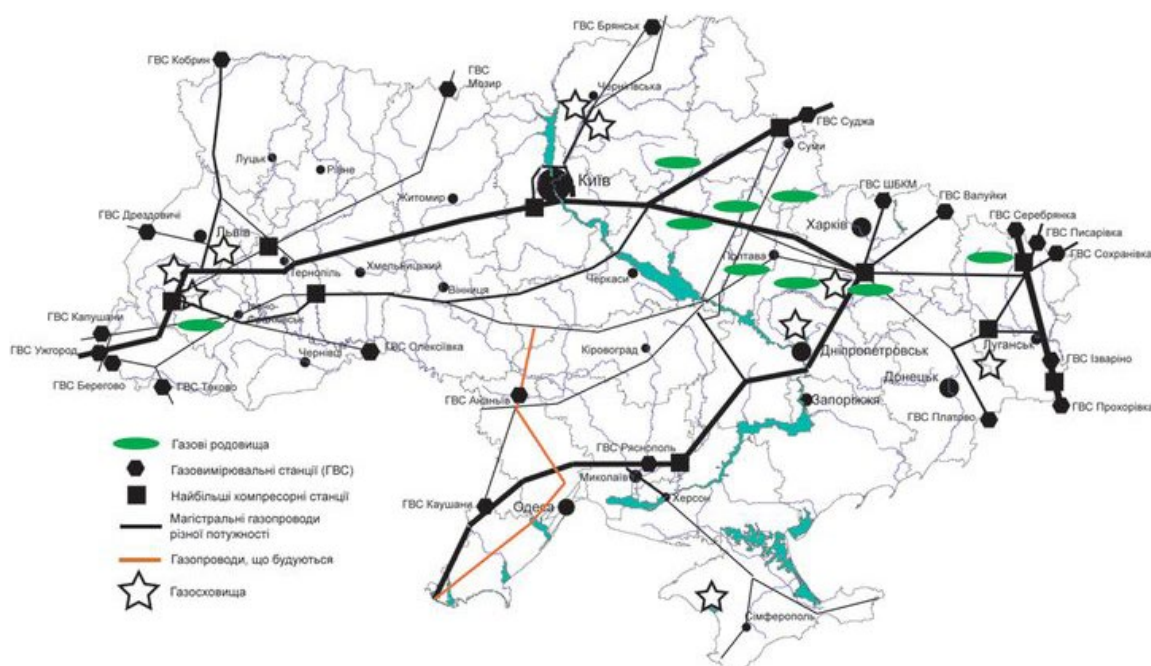


Рисунок 1 - Газотранспортна система України [6]

Українська ГТС історично виконувала функцію основного транзитного маршруту російського газу до ЄС, забезпечуючи понад 140 млрд м³/рік у 2000-х роках. Попри повномасштабне вторгнення Росії в Україну, запуск



альтернативних маршрутів і зниження попиту в Європі, українська система зберегла свою важливість завдяки модернізації компресорних станцій та розвитку реверсних потоків з ЄС.

Стратегічне значення ГТС України полягає не лише у її функціональності, а й у геополітичній, безпековій та економічній ролі. Система забезпечує життєво необхідне постачання газу для населення, промисловості та критичної інфраструктури, а також зміцнює енергетичну незалежність держави. В умовах війни вона відіграє роль елемента національної стійкості, дозволяючи оперативно реагувати на пошкодження й обстріли. Крім того, відповідно до Європейської водневої стратегії, українська ГТС розглядається як потенційний компонент майбутньої транс'європейської водневої мережі — це відкриває нові можливості для її інтеграції у спільний енергетичний простір ЄС [1].

З огляду на викладене, постійний моніторинг газопроводів є ключовою умовою для забезпечення їхньої безпеки, ефективності та стійкої роботи в умовах зовнішніх загроз і фізичного зношення. Регулярний контроль дозволяє своєчасно виявляти пошкодження, запобігати аваріям та підтримувати стабільне функціонування критичної інфраструктури.

Одним із найрезультативніших сучасних методів отримання просторових даних у стислий термін є технологія лазерного сканування. Завдяки високій потужності, точності та швидкодії сучасні сканувальні системи дають змогу виконувати детальну зйомку об'єктів у різних умовах [2]. Вони представлені в стаціонарних і мобільних модифікаціях, що зумовлює різноманіття підходів до їх практичного використання при моделюванні тривимірних об'єктів надземної інфраструктури. Інтеграція із GNSS-технологіями та інерціальними навігаційними системами забезпечує надійну просторову прив'язку сканованих даних до вибраної системи координат. Використання сучасного програмного забезпечення для камеральної обробки результатів дозволяє створювати точні 3D-моделі, які ефективно відображають реальний стан об'єктів і можуть бути використані для подальшого аналізу та візуалізації [4,5].



Виклад основного матеріалу дослідження.

Наземне безконтактне лазерне 3D сканування (отримання 3D геодезичної моделі) надземного переходу через річку із чотирнадцятьма опорами проводилось за допомогою лазерного сканера LeicaScanStation P40 (Рисунок 2).

Геодезичні роботи з наземного лазерного сканування полягають у відтворенні поверхні об'єктів у вигляді масиву точок. Одержані точки містять координати x , y , z , параметри відображення кольору RGB та інтенсивність відбиття лазерного променя. Було застосовано лазерний сканер LeicaScanStation P40, який має необхідні технічні характеристики, що дають змогу виконати вимоги до надання послуг по технічному діагностуванні надземних переходів газопроводів.



Рисунок 2 - Лазерний сканер LeicaScanStation P40

Технічні характеристики сучасних 3D лазерних сканерів забезпечують високі показники точності, що є критично важливим при моніторингу трубопровідної інфраструктури. В таблиці 1 наведено основні технічні характеристики лазерного сканера LeicaScanStation P40. Кутова точність приладу становить 8", що дозволяє фіксувати найменші відхилення в геометрії об'єкта. Точність вимірювання відстані сягає $1,2 \text{ мм} + 10 \text{ мм на } 50 \text{ метрів}$, а визначення просторового положення — до 3,0 мм на аналогічну відстань. Точність вимірювання марок складає 2,0 мм на 50 м, а моделювання поверхні —



до 1,0 мм, що забезпечує високоякісне відтворення реальної геометрії об'єктів у цифровій моделі.

Таблиця 1 - Технічні характеристики лазерного сканера LeicaScanStation P40

Параметр	Значення
Кутова точність	8"
Точність вимірювання відстані	1,2 мм + 10 мм на 50 м
Точність визначення просторового положення	3,0 мм на 50 м
Точність вимірювання марки	2,0 мм на 50 м
Точність моделювання поверхні	1,0 мм на 50 м

Лазерний сканер оснащений високошвидкісним відбивачем, лазерним далекоміром і системою зміни напрямку променю лазера – спеціальним поворотним дзеркалом. Для отримання детальної зйомки об'єкта були задані ділянки сканування (сектори повороту дзеркала) і крок сканування в кожному напрямку. Польові роботи зі сканування виконувалися в такій послідовності:

- аналіз території, де має проводитись сканування;
- розмічувальні роботи з урахуванням перекриття хмар точок;
- встановлення обладнання на місцевості на розмічених місцях, вимірювання координат станцій;
- сканування об'єкта з усіх станцій;
- завантаження даних проекту сканування у спеціалізоване програмне забезпечення;
- зшивання хмар точок, отриманих із різних станцій;
- врівноваження хмар точок із метою досягнення мінімальної похибки вимірювань;



- експорт до файлового розширення, котре можливо імпортувати в інші програмні продукти.

Хмару точок 3D сканування отримано в результаті реєстрації та врівноваження окремих сканів у програмному забезпеченні LeicaREGISTER360. Точність реєстрації та врівноваження становить 3,2 мм. Зображення врівноваженої хмари точок 3D сканування повітряного переходу наведено на рисунку 3.

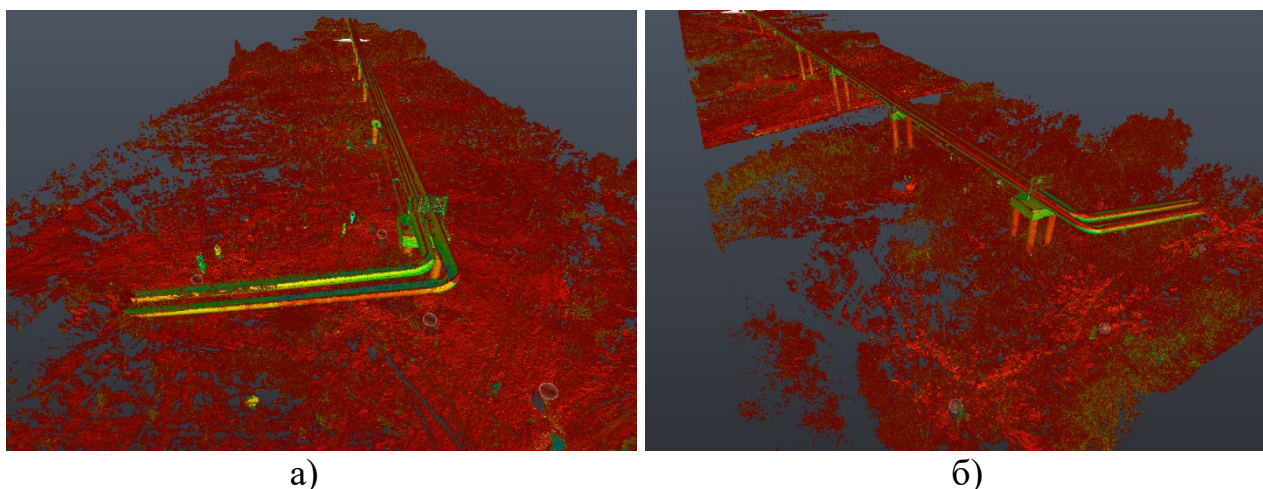


Рисунок 3 - Хмари точок 3D сканування а) вигляд з правого боку б) вигляд з лівого боку

Для моделювання повітряного переходу обрано технологію інформаційного моделювання будівель (BIM), реалізовану у ПЗ Autodesk Revit 2024. Суть методики полягала у ручній класифікації елементів повітряного переходу. Зображення підготовленої моделі повітряного переходу наведено на рисунку 4.

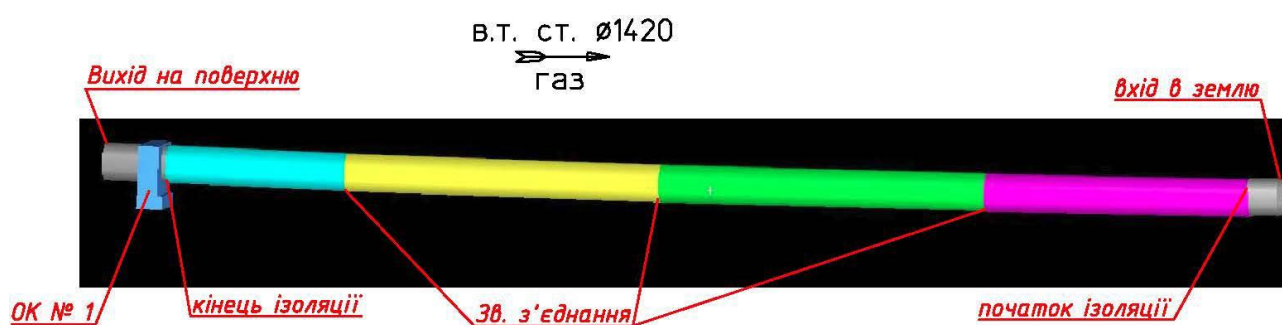
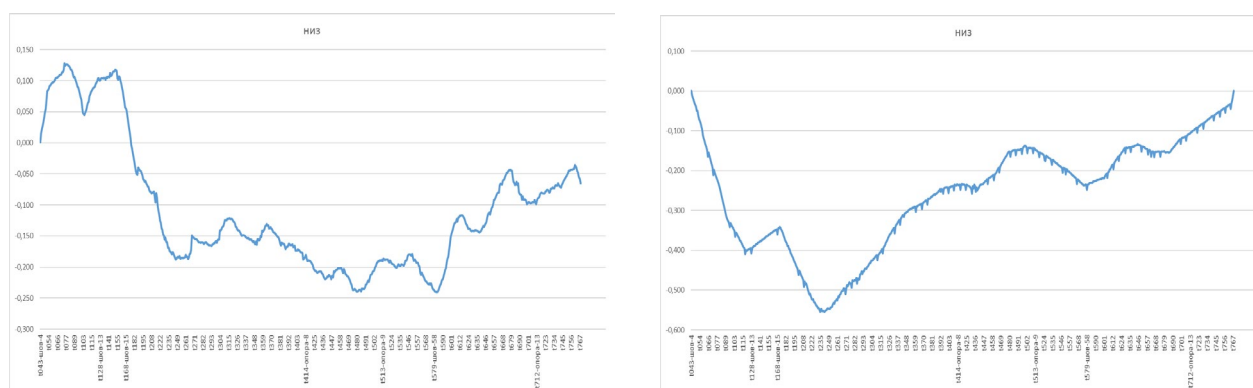


Рисунок 4 - Модель переходу лазерного 3D сканування



У ході просторового аналізу повітряного переходу магістрального газопроводу на основі 3D лазерного сканування було отримано хмару точок, яка відображає фактичну геометрію трубопроводу. Ці просторові дані було зіставлено з проектною (ідеальною) віссю, що проходить по центральній лінії трубопроводу у теоретично правильному положенні.

Для аналізу деформацій побудовано дві діаграми. Перша діаграма - відхилення у вертикальній площині — показує зміни по висот. Друга діаграма - відхилення у горизонтальній площині — показує зміщення в плані.



**Рисунок 4 – Діаграма деформацій а) відхилення у вертикальній площині
б) відхилення у горизонтальній площині**

У процесі топографо-геодезичних обстежень надземного переходу газопроводу було виявлено наявність відхилень фактичної осі трубопроводу від умовної як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. У вертикальному напрямку зафіксовано характерний прогин конструкції вниз, що спостерігається на окремих ділянках між виходом газопроводу з ґрунту та його повторним входом. Горизонтальні відхилення також мали чітко виражену тенденцію до зміщення в один бік, з максимальними значеннями у середній частині прольоту. На основі отриманих даних було побудовано графіки, які відображають зміну положення осі трубопроводу по довжині переходу. Аналіз результатів показав, що всі фактичні відхилення перебувають у межах допустимих норм і не перевищують розрахункових значень. Це свідчить про задовільний технічний стан дослідженої ділянки трубопроводу та відсутність ознак критичних деформацій.



Висновки

Проведене дослідження підтвердило ефективність інтегрованого підходу до моніторингу технічного стану магістральних газопроводів з використанням сучасних геодезичних методів. Зокрема, застосування технології 3D лазерного сканування дозволило отримати високоточні просторові дані щодо фактичної геометрії надземного переходу, виявити навіть незначні відхилення трубопроводу від умовної осі та оцінити їхню відповідність нормативним показникам.

На основі побудованих діаграм деформацій у вертикальній і горизонтальній площинах встановлено, що фактичні відхилення перебувають у межах допустимих норм, а конструкція зберігає стабільний технічний стан. При цьому саме 3D сканування забезпечило безконтактний, швидкий та надзвичайно точний аналіз просторової форми об'єкта, що неможливо було б досягти лише традиційними методами.

Таким чином, регулярне використання лазерного 3D сканування як інструменту технічної діагностики є доцільним і стратегічно обґрунтованим для підвищення рівня безпеки та прогнозованості функціонування газотранспортної системи України, особливо в умовах воєнних загроз і техногенних викликів.

Література:

1. Януль, С., Павлов, К., Коротя, М., & Галянт, С. (2019). Характеристика газотранспортної системи України. Економічний вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки, 1(17), 31–38. <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2019-01-31-38>
2. Олеськів, Р. Є., & Гера, О. В. (2019). Сучасні геодезичні методи моніторингу технічного стану наземних об'єктів нафтогазової промисловості. Технічні науки та технології, 6(2), 221–227. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.6-2/38>
3. European Hydrogen Backbone (EHB). (2022). Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. EHB Initiative.



<https://ehb.eu/files/downloads/EHB-Analysing-the-future-demand-supply-and-transport-of-hydrogen-June-2021-v3.pdf>

4. Singh, P., Kumar, A., & Gupta, R. (2025). Monitoring and leak detection methods in pipelines: A systematic literature review. *Journal of Infrastructure Systems*, Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44245-025-00102-w>

5. Yuan, J., Mao, W., Hu, C., Zheng, J., Zheng, D., & Yang, Y. (2023). Leak detection and localization techniques in oil and gas pipeline: A bibliometric and systematic review. *Engineering Failure Analysis*, 146, 107060. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107060>

6. Чернова О. Т. Аналіз розвитку мережі підземних сховищ газу України / О.Т. Чернова // Розробка родовищ: Зб. наук. пр. — 2014. — Т. 8. — С. 261-276.

Abstract. *The article presents the results of spatial monitoring of the technical condition of Ukraine's gas transmission system using modern geodetic technologies, particularly terrestrial 3D laser scanning. The research was conducted on an above-ground gas pipeline crossing over a river supported by fourteen piers. A high-precision point cloud was obtained using a LeicaScanStation P40 scanner, accurately reflecting the actual geometry of the pipeline. Building Information Modeling (BIM) technology in Autodesk Revit was applied to develop a spatial model and analyze deformations. A comparison between the actual and design axes of the pipeline in both vertical and horizontal planes revealed characteristic deflections and displacements. The diagnostic results confirmed that the technical condition of the structure is satisfactory, with all deviations remaining within permissible limits. The proposed approach demonstrates the effectiveness of 3D scanning as a tool for high-precision diagnostics of critical infrastructure objects under conditions of technological and wartime challenges.*

Key words: *gas transmission system, pipeline monitoring, 3D scanning, GNSS, spatial analysis, technical diagnostics, critical infrastructure.*

Статтю надіслано: 05.05.2025 р.

© Романюк В.В.