

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури, будівництва та енергетики
Кафедра геодезії та землеустрою

Михайлишин Владислав Віталійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.48
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

«МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДУ
ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-СКАНУВАННЯ»
(назва роботи)

Геодезія та землеустрій
(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій
(шифр і назва спеціальності)

Михайлишин В. В.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник: к.т.н, доцент Володимир РОМАНЮК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

Професор проф. Микола ПРИХОДЬКО
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

Доцент
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва ІФНТУНГ-ДонНАБА
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Михайлишин Владислав Віталійович

1. Тема роботи – «Моніторинг деформацій надземного газопроводу за допомогою 3D-сканування».

Керівник роботи _____.

Наказ ректора від «__» _____ 2025 року № _____.

2. Термін подання студентом роботи – _____ 2025 року.

3. Вихідні дані до роботи: 1. Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Аналіз сучасного стану та особливостей функціонування газотранспортної системи України 2. методи моніторингу трубопроводів 3. 3D сканування газопроводу

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Модель переходу лазерного 3D сканування

2. Хмари точок 3D сканування

3. Діаграма деформацій

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання – «01» вересня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Формування теми, визначення мети, об'єкта та предмета дослідження</i>	01.10.25- 15.11.25	
2	<i>Опрацювання наукових джерел і теоретичних основ моніторингу</i>	16.11.25- 19.11.25	
3	<i>Опрацювання хмари точок</i>	20.11.25- 25.11.25	
4	<i>Огляд технологій 3D-сканування для інфраструктурного моніторин</i>	26.11.25- 13.12.25	
5	<i>Аналіз результатів, оцінки прогину труби</i>	14.12.25- 17.12.25	
6	<i>Оформлення магістерської роботи та підготовка до захисту</i>	18.12.25- 21.12.25	

Студент

(підпис)

Михайлишин В. В.
(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

(розшифровка підпису)

ЗМІСТ

1 Аналіз сучасного стану та особливостей функціонування газотранспортної системи України.....	6
1.1 Сучасний стан та виклики газотранспортної системи України	6
1.2 Роль моніторингу газотранспортної системи у забезпеченні енергетичної безпеки України.....	7
1.3 Газотранспортна система України: сучасні виклики та інноваційні методи моніторингу	10
2 Методи моніторингу трубопроводів	12
2.1 Актуальні методи проведення моніторингу.....	12
2.2 Методика проведення моніторингу трубопроводів.....	13
2.3 Інтеграція сучасних методів моніторингу	15
2.4 Аналіз існуючих досліджень моніторингу трубопроводів	17
2.5 Аналіз існуючих досліджень моніторингу трубопроводів	18
2.6 Огляд технологій 3D-сканування для інфраструктурного моніторингу	19
3 3D Сканування ГАЗОПРОВОДУ	22
3.1 Територіальне розташування надземного переходу газопроводу.....	22
3.2 Загальні відомості про район виконання робіт	23
3.6 Сканування трубопроводу	26
3.6 Загальні відомості про район виконання робіт	31
ВИСНОВКИ	33
Список використаної літератури	34
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	37

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 41 сторінок, 8 рисунки, 17 посилань.

Мета роботи – є обґрунтування та експериментальне підтвердження ефективності застосування технології 3D лазерного сканування для просторового моніторингу технічного стану надземного газопроводу та визначення характеру деформацій з метою забезпечення безпечної та надійної експлуатації газотранспортної системи України.

Об'єктом дослідження – є надземний перехід магістрального газопроводу через водну перешкоду, що складається з чотирнадцяти опор.

Предметом дослідження – є процеси просторового моніторингу, діагностики та виявлення деформацій надземних газопроводів із використанням сучасних геодезичних технологій, зокрема 3D лазерного сканування та BIM-моделювання.

У роботі 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.

МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ ТРУБОПРОВІДІВ, 3D ЛАЗЕРНЕ СКАНУВАННЯ,
ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ.

ABSTRACT

Calculation and explanatory note: 41 pages, 8 figures, 17 references.

The aim of this work is to substantiate and experimentally confirm the effectiveness of using 3D laser scanning technology for spatial monitoring of the technical condition of an above-ground gas pipeline and to determine the nature of deformations in order to ensure the safe and reliable operation of Ukraine's gas transmission system.

The object of the study is an above-ground crossing of a main gas pipeline over a water obstacle, consisting of fourteen supports.

The subject of the study is the processes of spatial monitoring, diagnostics, and detection of deformations in above-ground gas pipelines using modern geodetic technologies, in particular 3D laser scanning and BIM modeling.

The paper presents the results of spatial monitoring of the technical condition of Ukraine's gas transmission system using modern geodetic technologies, specifically terrestrial 3D laser scanning. The research was carried out on the example of an above-ground crossing of a main gas pipeline over a water obstacle, consisting of fourteen supports. Using the LeicaScanStation P40 scanner, a high-precision point cloud was obtained, reflecting the actual geometry of the pipeline. BIM modeling in the Autodesk Revit environment was applied to create a spatial model and analyze deformations. A comparison between the actual and design axes of the pipeline in the vertical and horizontal planes allowed for the identification of characteristic sags and displacements. The diagnostic results established that the technical condition of the structure is satisfactory, with all deformations within acceptable limits. The proposed approach confirmed the effectiveness of 3D scanning as a tool for high-precision diagnostics of critical infrastructure objects under technological and wartime challenges.

PIPELINE DEFORMATION MONITORING, 3D LASER SCANNING, SPATIAL ANALYSIS..

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.

Газотранспортна система (ГТС) України відіграє надзвичайно важливу роль у забезпеченні енергетичної стабільності як на національному, так і на європейському рівнях. Історично вона була головним транзитним шляхом для постачання природного газу з Російської Федерації до країн Європейського Союзу. Проте з початком збройної агресії Росії проти України та зміною енергетичних пріоритетів Європи ситуація кардинально змінилася. Обсяги транзиту суттєво знизились, а з 2025 року він був фактично припинений. Незважаючи на це, внутрішня функціональність української ГТС збереглася завдяки модернізації, технічній переорієнтації та зростанню реверсних поставок з країн ЄС.

Сучасні виклики, зокрема воєнні загрози, фізичне старіння трубопроводів та екологічні ризики, вимагають нового підходу до експлуатації та обслуговування інфраструктури. Одним із ключових інструментів забезпечення безпеки та надійності є регулярний моніторинг стану трубопроводів із використанням інноваційних технологій. У цьому контексті особливого значення набувають геодезичні, дистанційні та автоматизовані методи, що дозволяють виявляти деформації, витіки та інші дефекти на ранніх стадіях. Актуальність дослідження також посилюється перспективою інтеграції ГТС України до майбутньої європейської водневої інфраструктури

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

1.1 Сучасний стан та виклики газотранспортної системи

України

Газотранспортна система України (ГТС) є однією з найбільших та найважливіших у Європі, відіграючи ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки як самої країни, так і Європейського Союзу. Її стратегічне розташування та розгалужена інфраструктура дозволяють транспортувати значні обсяги природного газу від східних постачальників до західних споживачів.

Станом на 2024 рік, загальна протяжність газопроводів ГТС України становить приблизно 38 550 км, включаючи 22 160 км магістральних та 16 390 км розподільчих трубопроводів . Система оснащена 72 компресорними станціями з 702 компресорами, що забезпечують загальну потужність 5 443 МВт. Крім того, в Україні функціонує 13 підземних газових сховищ із загальною активною ємністю 30,9 млрд м³, що є другим за величиною показником у Європі після Росії [1].

ГТС України має 12 точок входу з територій Росії, Білорусі, Польщі, Словаччини та Угорщини, а також 7 основних точок виходу до Польщі, Словаччини, Угорщини, Румунії та Молдови . Технічна пропускна здатність системи становить близько 288 млрд м³ на рік на вході та 178 млрд м³ на виході. Проте, внаслідок геополітичних змін та зниження обсягів транзиту російського газу, фактичне використання потужностей ГТС значно зменшилося.

Історично ГТС України була побудована для транспортування природного газу з Росії до Європи. Основні магістральні газопроводи, такі як «Уренгой – Помари – Ужгород», «Союз» та «Прогрес», були введені в експлуатацію в 1970–1980-х роках і забезпечували транзит значних обсягів газу до країн Європи . Однак, після 2014 року та особливо після повномасштабного

вторгнення Росії в Україну в 2022 році, обсяги транзиту суттєво скоротилися. У 2024 році через українську ГТС було прокачано лише 14 млрд м³ російського газу .

В умовах зниження транзитних обсягів та зростання внутрішнього попиту, Україна активізувала зусилля щодо модернізації та оптимізації своєї ГТС. Зокрема, впроваджуються сучасні технології моніторингу та діагностики стану трубопроводів, включаючи використання 3D-сканування для виявлення деформацій та пошкоджень . Такі заходи сприяють підвищенню надійності та безпеки експлуатації системи, а також дозволяють своєчасно виявляти потенційні ризики та запобігати аваріям [7].

Крім того, Україна активно розвиває можливості реверсного постачання газу з країн Європи, що дозволяє зменшити залежність від російського газу та забезпечити стабільність внутрішнього ринку. Також розглядаються перспективи використання підземних сховищ газу для зберігання стратегічних запасів та надання послуг зберігання для європейських партнерів.

Таким чином, газотранспортна система України залишається ключовим елементом енергетичної інфраструктури країни та важливим чинником енергетичної безпеки Європи. Попри виклики та загрози, пов'язані з геополітичними змінами та військовими діями, Україна продовжує модернізувати та адаптувати свою ГТС до нових умов, забезпечуючи надійне постачання природного газу споживачам.

1.2 Роль моніторингу газотранспортної системи у забезпеченні енергетичної безпеки України

Газотранспортна система України (ГТС України) — це одна з найбільших і найважливіших інфраструктурних систем у Європі, що забезпечує транспортування природного газу як для внутрішнього споживання, так і для експорту та імпорту між Україною та країнами ЄС. Газотранспортна система

України охоплює понад 38 000 км магістральних і розподільних газопроводів, що робить її однією з найбільших у Європі (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Газотранспортна система України

Газотранспортна система України є стратегічною інфраструктурою, яка історично відігравала ключову роль у забезпеченні енергетичної стабільності як всередині країни, так і в регіональному контексті. До початку повномасштабного вторгнення Російської Федерації в Україну (лютий 2022 року), українська ГТС залишалась основним маршрутом транзиту російського природного газу до Європейського Союзу, забезпечуючи постачання на рівні понад 140 млрд м³/рік у 2000-х роках. Проте внаслідок агресії РФ, змін на енергетичному ринку ЄС, запуску альтернативних маршрутів та зниження попиту, обсяги транзиту зменшились до 15,4 млрд м³ у 2024 році, а з січня 2025 року — транзит припинено повністю [1].

Попри це, газотранспортна система залишається критично важливою для України. Вона забезпечує життєво необхідне транспортування газу для населення, промисловості, об'єктів критичної інфраструктури та теплоенергетики. Завдяки модернізації компресорних станцій і розвитку реверсних потоків, Україна отримала можливість імпортувати газ з країн

Європейського Союзу через Словаччину, Угорщину, Польщу, що суттєво знизило залежність від Росії [2].

У стратегічному вимірі важливість ГТС визначається не лише її функціональністю, а й потенціалом трансформації. Згідно з Європейською водневою стратегією, вже в найближчі роки передбачається створення транс'європейської водневої мережі. Українська ГТС, у зв'язку з наявністю великого резерву потужностей та підземних сховищ, розглядається як потенційна частина цієї мережі. Перехід до транспортування водню чи біометану міг би відновити стратегічне значення української системи для ЄС [3].

Виходячи з вище зазначеного можна зробити висновок що газотранспортна система (ГТС) України є надзвичайно важливим стратегічним елементом держави, особливо в умовах триваючої російської агресії. Її значення виходить далеко за межі лише енергетичної сфери — вона відіграє ключову роль у національній безпеці, економічній стабільності та геополітичному позиціонуванні України. Саме тому важливим фактором є постійний моніторинг ГТС.

Постійний моніторинг газотранспортної системи є критично важливим для забезпечення її безпечної, надійної та ефективної експлуатації, особливо в умовах війни, фізичного зношення інфраструктури та зростаючих техногенних ризиків. Своєчасне виявлення витоків газу, розгерметизацій, корозії, механічних пошкоджень або зовнішніх втручань дозволяє запобігати аваріям, техногенним катастрофам та зберігати життя людей. Моніторинг сприяє продовженню ресурсу трубопроводів, мінімізує фінансові втрати завдяки плановому ремонту та оптимізує роботу системи за рахунок точного контролю тиску, обсягів та режимів транспортування. В умовах російської агресії оперативний контроль ГТС дозволяє своєчасно реагувати на обстріли, уникати масштабних пошкоджень і зберігати функціонування критичної інфраструктури. Крім того, наявність системного моніторингу є однією з вимог

європейських стандартів, що сприяє підвищенню довіри до української ГТС з боку міжнародних партнерів та інтеграції у спільний енергетичний простір ЄС.

1.3 Газотранспортна система України: сучасні виклики та інноваційні методи моніторингу

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 (рисунок 1.2)[6].

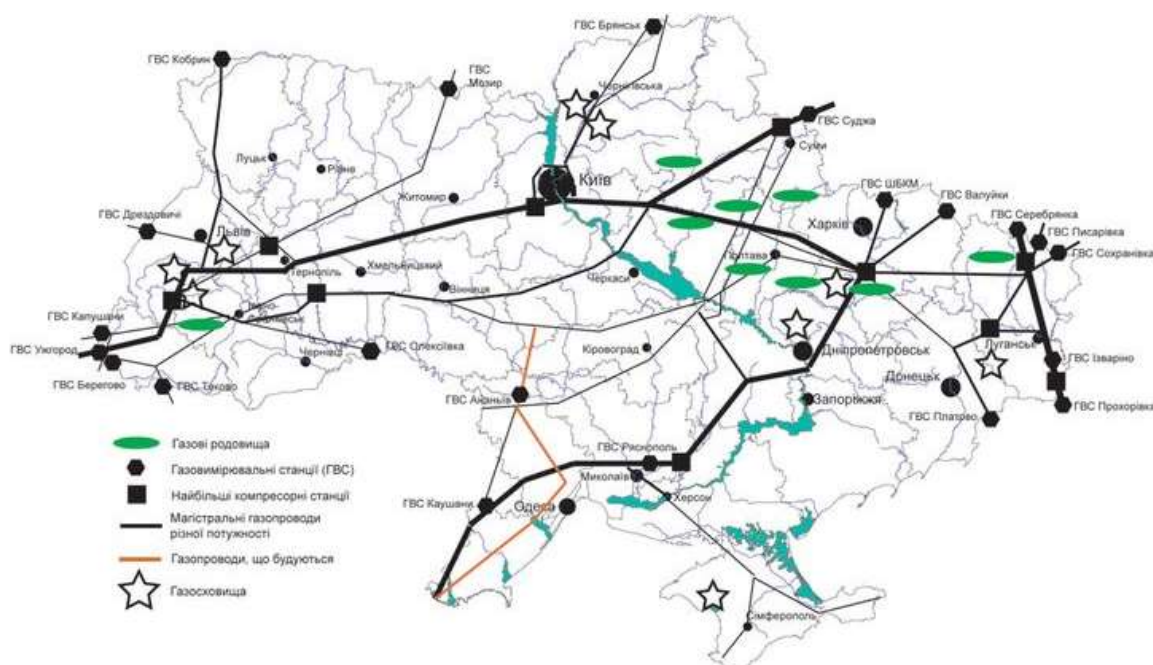


Рисунок 1.2 - Газотранспортна система України [6]

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].

2 МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ТРУБОПРОВОДІВ

Моніторинг газопроводів — це систематичний процес спостереження, вимірювання та оцінки технічного стану газотранспортної системи або окремих її елементів (газопроводів, вузлів, опорних конструкцій) з метою виявлення відхилень від проектної геометрії, пошкоджень, деформацій та інших потенційно небезпечних змін. Моніторинг передбачає використання спеціалізованих методів і технологій (зокрема, 3D лазерного сканування, GNSS, геодезичних зйомок), що дозволяють збирати просторові та технічні дані, їх обробку та аналіз. Цей процес спрямований на забезпечення безпечної, надійної та ефективної експлуатації газотранспортної системи, своєчасного виявлення дефектів і запобігання аварійним ситуаціям.

2.1 Актуальні методи проведення моніторингу

Сучасні методи моніторингу трубопроводів охоплюють широкий спектр технологій, які умовно поділяються на внутрішні, зовнішні та дистанційні(геодезичні). Дані методи мають як переваги так і недоліки (таблиця 1). Внутрішні методи включають інтелектуальні поршні (PIGs), які здійснюють повноцінну діагностику стану труби зсередини, а також ультразвукову інспекцію для виявлення дефектів у матеріалі. Зовнішній моніторинг реалізується через віброакустичні сенсори, газоаналізатори, оптоволоконні системи та термографію, які дозволяють виявляти витоки, вібрації, температурні аномалії або зовнішні пошкодження в реальному часі. Дистанційні методи, як-от моніторинг з дронів, супутників або використання GIS/SCADA-систем, забезпечують широке охоплення території та оперативний контроль за ключовими параметрами функціонування системи. Кожен із методів має свої переваги і обмеження, тому в сучасній практиці часто застосовуються комбіновані підходи для забезпечення надійного та безперервного моніторингу. За даними сучасних досліджень [4, 5],

впровадження інтегрованих систем моніторингу значно знижує ризики аварій та підвищує ефективність роботи газотранспортної інфраструктури.

Таблиця 2.1 - Методи моніторингу трубопроводів

Метод моніторингу	Переваги	Недоліки
Інтелектуальні поршні (PIGs)	Точна діагностика внутрішніх дефектів, надійність	Дороговартісне обладнання, необхідність зупинки потоку
Ультразвукова інспекція	Висока точність, добре підходить для корозійного аналізу	Обмежене застосування без поршнів
Віброакустичний моніторинг	Миттєве виявлення аномалій, постійний контроль	Можливі помилкові спрацьовування через фонові вібрації
Газоаналізатори	Виявлення витоків у підземних ділянках	Чутливі до вологих умов, обмежена зона виявлення
Оптоволоконні сенсори	Постійний моніторинг, охоплює великі відстані	Висока вартість встановлення та обслуговування
Інфрачервоне сканування (термографія)	Швидке виявлення температурних аномалій	Менш ефективно в теплово стабільних умовах
Безпілотні літальні апарати (БПЛА)	Гнучкість, огляд важкодоступних місць	Залежність від погодних умов, обмежений час польоту
Супутниковий моніторинг	Велике охоплення, незалежність від погодних умов	Низька роздільна здатність, потреба в складному аналізі
GIS/SCADA-системи	Автоматизація, управління в реальному часі	Потребує комплексного налаштування, висока вартість
3D лазерне сканування	Детальне виявлення деформацій, точна геометрична модель трубопроводів; неінвазивність	Висока вартість обладнання, потреба у спеціалістах і ПЗ для обробки даних
Нівелювання, GNSS-спостереження, тахеометрія	Проста та точна фіксація вертикальних зміщень ґрунту або трубопроводу; недороге обладнання	Низька ефективність для довгих ділянок без реперів

2.2 Методика проведення моніторингу трубопроводів

Першим кроком у процесі моніторингу трубопроводної інфраструктури є збір і аналіз наявної проектної, виконавчої та експлуатаційної документації [4]. Особлива увага приділяється визначенню типу трубопроводу, його довжини, діаметра, віку, матеріалу та історії попередніх аварій чи дефектів. Здійснюється

ризик-аналіз для виявлення потенційно небезпечних ділянок (перетини з комунікаціями, зони зсувів, старі ділянки).

Планування спостережень

На основі зібраної інформації складається графік моніторингу, який може бути регулярним, сезонним або оперативним. Визначаються контрольні ділянки та опорні точки для вимірювань. Вибір методу моніторингу залежить від технічного стану об'єкта, мети спостереження, доступного бюджету та логістичних умов [5]. До найефективніших методів належать: 3D лазерне сканування, нівелювання, інтелектуальні поршні (PIG), оптоволоконні сенсори, віброакустичний контроль, супутниковий моніторинг та застосування БПЛА.

На польовому етапі застосовуються різні методи залежно від об'єкта моніторингу:

Геодезичні методи — нівелювання, GNSS-спостереження, тахеометрія для фіксації деформацій та осідань труб. Геодезичні спостереження є основою для побудови систем довгострокового моніторингу просторового положення трубопроводів, особливо на ділянках з підвищеною динамікою геологічного середовища.

3D лазерне сканування — створення точних моделей трубопроводів для виявлення викривлень та ушкоджень.

Внутрішня діагностика — з використанням інтелектуальних поршнів (PIGs), оснащених сенсорами для виявлення тріщин, зносу та корозії.

Зовнішній моніторинг — застосування оптоволоконних ліній, газоаналізаторів, термографії.

Дистанційний моніторинг — за допомогою БПЛА або супутників (InSAR, мультиспектральні знімки).

Отримані дані обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Хмари точок з лазерного сканування перетворюються на 3D-моделі, здійснюється порівняння з попередніми періодами. Для геодезичних вимірів будуються графіки зміщень, виконується аналіз горизонтальних і вертикальних переміщень реперів, створюються деформаційні карти. Дані

SCADA чи датчиків інтегруються в цифрові системи управління трубопроводами. Результати оформлюються у вигляді технічного звіту з картосхемами, таблицями, фотофіксацією та висновками

На основі аналізу встановлюється ступінь небезпеки виявлених змін. Пошкодження класифікуються за критичністю, приймається рішення про оперативне втручання або плановий ремонт. Дані оновлюються в базі спостережень і використовуються для подальшого прогнозування технічного стану системи.

Газотранспортна система України залишається ключовим елементом енергетичної, економічної та національної безпеки держави. У складних умовах війни, зміни європейського енергоринку та припинення транзиту російського газу, система зберегла свою функціональність завдяки технічній гнучкості, модернізації та інтеграції з енергосистемою ЄС. Постійний моніторинг ГТС є необхідною умовою її стабільної роботи, вчасного реагування на загрози та запобігання надзвичайним ситуаціям. Сучасні методи контролю, включаючи геодезичні технології, 3D сканування, SCADA-системи, супутниковий і дронний моніторинг, забезпечують точний аналіз стану трубопроводів та прийняття обґрунтованих рішень. У довгостроковій перспективі ГТС може стати важливою складовою водневої інфраструктури Європи, а її модернізація — інструментом енергетичного переходу України.

2.3 Інтеграція сучасних методів моніторингу

Моніторинг трубопроводів є критично важливою складовою забезпечення безпечної та надійної експлуатації газотранспортної системи. У сучасних умовах, коли технічні ризики, фізичне зношення та зовнішні загрози (зокрема, пов'язані з воєнними діями чи терористичними атаками) значно підвищують ймовірність виникнення аварій, систематичний контроль стану трубопроводів набуває особливого значення.

Методи моніторингу трубопроводів класифікуються залежно від джерела та способу збору інформації. Традиційні методи передбачають використання

візуального контролю та геодезичних інструментів (тахеометричні вимірювання, нівелювання) для виявлення деформацій та пошкоджень трубопроводів. Ці методи дозволяють здійснювати періодичні перевірки та визначати відхилення від проектної геометрії.

Із розвитком цифрових технологій та вимог до високоточної діагностики набули поширення сучасні методи моніторингу, зокрема лазерне 3D-сканування. Цей метод дозволяє створювати детальні цифрові моделі трубопровідної інфраструктури та аналізувати навіть мінімальні зміщення, прогини чи деформації. За допомогою наземних лазерних сканерів (наприклад, LeicaScanStation P40) формується «хмара точок», яка з високою точністю відображає фактичний стан об'єкта. Отримані дані можна інтегрувати з програмним забезпеченням для просторового моделювання (BIM), що значно підвищує ефективність інтерпретації результатів.

Ще одним важливим напрямом моніторингу є використання GNSS-технологій та супутникових даних, які дають змогу відслідковувати глобальні зміни положення об'єктів та отримувати дані в реальному часі. Ці технології особливо корисні для довготривалих спостережень та попередження геодинамічних загроз, таких як осідання ґрунтів чи зсуви.

Крім того, застосовуються дистанційні методи моніторингу, наприклад, тепловізійні зйомки, ультразвукове та акустичне зондування. Такі методи допомагають виявляти внутрішні дефекти та витіки газу, які не можна зафіксувати візуально чи геодезичними засобами.

Інтеграція різних методів моніторингу дозволяє створити комплексну систему контролю технічного стану трубопроводів, яка відповідає сучасним стандартам безпеки та екологічної відповідальності. У результаті, регулярне застосування таких методів не тільки мінімізує ризики аварій та техногенних катастроф, але й підвищує рівень надійності газотранспортної системи в цілому.

2.4 Аналіз існуючих досліджень моніторингу трубопроводів

Моніторинг трубопроводів є важливою складовою забезпечення безпечної експлуатації газотранспортної інфраструктури та інших інженерних мереж. У зв'язку з високою вартістю та стратегічним значенням таких об'єктів, дослідження у сфері їх моніторингу активно розвиваються у багатьох країнах світу.

У науковій літературі виділяють кілька основних напрямів досліджень. Перший напрям пов'язаний із використанням традиційних геодезичних методів, таких як нівелювання, тахеометрична зйомка та GNSS-спостереження для визначення деформацій трубопроводів (Януль та ін., 2019). Ці методи дозволяють фіксувати геометричні зміни трубопроводів у межах окремих ділянок та здійснювати регулярний контроль їхнього положення.

Другий напрям — застосування безконтактних методів просторового сканування, зокрема лазерного 3D-сканування. У дослідженнях Олеськіва та Гери (2019) було показано, що технологія 3D-сканування дозволяє створювати детальні тривимірні моделі трубопроводів, виявляти навіть незначні деформації та оцінювати їхній вплив на загальну стабільність конструкцій. Використання 3D-сканування значно підвищує швидкість і точність обстежень, а також забезпечує можливість повторного аналізу даних без повторного виходу в поле.

Третій напрям досліджень охоплює автоматизовані системи моніторингу та використання дистанційних методів. Зокрема, у статті Singh та ін. (2025) наведено огляд сучасних методів виявлення витоків і пошкоджень трубопроводів, зокрема акустичних, ультразвукових та тепловізійних. Це дає змогу проводити моніторинг у режимі реального часу та оперативно реагувати на виникнення потенційно небезпечних ситуацій.

Важливим аспектом сучасних досліджень є інтеграція різних методів моніторингу в єдину інформаційну систему. Yuan та ін. (2023) відзначають важливість поєднання GNSS-даних, результатів лазерного сканування та автоматизованих систем виявлення пошкоджень для створення комплексної

системи управління безпекою трубопроводів. Такі підходи відповідають вимогам європейських стандартів та сприяють підвищенню надійності функціонування газотранспортної системи.

Таким чином, огляд існуючих досліджень демонструє, що застосування сучасних методів моніторингу — таких як 3D-сканування, GNSS, тепловізійні та акустичні дослідження — є ефективним інструментом забезпечення технічної діагностики та підвищення безпеки експлуатації трубопроводів. Інтеграція цих методів у єдину систему моніторингу дозволяє своєчасно виявляти пошкодження та здійснювати прогнозування їхнього розвитку, що має ключове значення в умовах підвищених техногенних та воєнних загроз.

2.5 Аналіз існуючих досліджень моніторингу трубопроводів

У багатьох країнах світу питання моніторингу трубопроводів приділяється значна увага, оскільки це безпосередньо пов'язано з енергетичною безпекою, надійністю постачання енергоносіїв та мінімізацією ризиків виникнення аварійних ситуацій. Закордонний досвід демонструє широкий спектр застосування як традиційних, так і інноваційних технологій для контролю стану газопроводів та інших інженерних мереж.

У Сполучених Штатах Америки, Канаді та країнах Європейського Союзу широко використовуються автоматизовані системи моніторингу трубопроводів, що включають сенсори тиску, температури, деформації, а також системи акустичного та ультразвукового контролю. Ці системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг трубопровідних мереж у режимі реального часу та оперативно реагувати на виникнення позаштатних ситуацій (Singh et al., 2025).

Одним із важливих інструментів моніторингу трубопроводів у країнах ЄС є лазерне 3D-сканування та інтеграція отриманих даних у BIM-моделі. Цей підхід дає змогу не лише оцінити фактичний стан об'єкта, а й виконувати прогнозування змін та планування ремонтних заходів (Yuan et al., 2023). Такі технології, наприклад, активно застосовуються в Німеччині, Нідерландах та Великій Британії під час моніторингу магістральних газопроводів і тепломереж.

У Канаді та США застосовуються також мобільні системи лазерного сканування, встановлені на автомобілях або дронах. Це дозволяє значно скоротити час збору даних та підвищити точність просторових моделей трубопровідних систем. Крім того, в цих країнах активно застосовуються методи дистанційного зондування, зокрема тепловізійна діагностика, що допомагає виявляти витoki газу або локальні аномалії температури на поверхні ґрунту (Singh et al., 2025).

Варто відзначити досвід Японії та Південної Кореї, де активно впроваджуються інтелектуальні системи моніторингу на основі аналізу великих даних (Big Data) та штучного інтелекту. Це дозволяє здійснювати прогнозування можливих пошкоджень та оптимізувати стратегії обслуговування трубопровідної інфраструктури.

Таким чином, закордонний досвід проведення моніторингу трубопроводів демонструє важливість інтеграції різних методів та сучасних цифрових технологій для створення комплексних систем моніторингу. Ці підходи дозволяють підвищити безпеку та надійність експлуатації трубопроводів, а також забезпечують відповідність сучасним міжнародним стандартам управління технічним станом критичної інфраструктури.

2.6 Огляд технологій 3D-сканування для інфраструктурного моніторингу

Сучасні технології 3D-сканування набувають все більшого поширення в сфері моніторингу інженерної інфраструктури, зокрема трубопроводів, мостів, будівель та інших об'єктів критичної важливості. Їхня ефективність та універсальність зумовлені високою точністю вимірювань, швидкістю отримання даних та можливістю створення детальних цифрових моделей об'єктів.

Основу більшості технологій 3D-сканування становлять лазерні сканери, які генерують так звану «хмару точок» – масив тривимірних координат, що

описує фактичну геометрію об'єкта. Одним із найпоширеніших типів є наземні лазерні сканери (TLS, terrestrial laser scanning), які забезпечують високу точність і деталізацію вимірювань. Прикладами таких сканерів є LeicaScanStation P40, Trimble TX8, Riegl VZ-400 та інші, які активно застосовуються для обстеження об'єктів трубопровідної інфраструктури (Олеськів & Гера, 2019).

Особливо важливою є можливість інтеграції технології 3D-сканування з геодезичними системами GNSS та інерціальними навігаційними системами. Це забезпечує надійну просторову прив'язку отриманих даних до вибраної системи координат та дозволяє порівнювати фактичні геометричні параметри з проектними моделями об'єктів.

Важливим аспектом 3D-сканування є обробка отриманих даних. Використання спеціалізованого програмного забезпечення, такого як Leica Cyclone, Autodesk ReCap або Bentley ContextCapture, дозволяє виконувати камеральну обробку, створювати точні 3D-моделі та проводити подальший аналіз отриманої інформації. Такі моделі можуть бути використані у середовищі BIM (Building Information Modeling) для інтеграції з іншими даними та прийняття обґрунтованих рішень щодо експлуатації об'єктів.

Окрім наземних сканерів, у зарубіжній практиці набуває поширення використання мобільних лазерних сканерів (MLS, mobile laser scanning) та аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів (UAV, drones). Ці технології дозволяють швидко збирати просторові дані на великих територіях та у важкодоступних місцях. Наприклад, у Канаді та США активно використовуються дрони, оснащені 3D-сканерами, для обстеження довгих магістральних газопроводів і виявлення дефектів, які не можна побачити з землі (Singh et al., 2025).

У підсумку, сучасні технології 3D-сканування відкривають нові можливості для моніторингу технічного стану об'єктів критичної інфраструктури. Вони дозволяють створювати високоточні цифрові моделі, що значно підвищує якість діагностики та сприяє запобіганню аварійним

ситуаціям. Інтеграція таких технологій у комплексну систему моніторингу відповідає міжнародним стандартам безпеки та забезпечує високий рівень експлуатаційної надійності об'єктів.

3 3D СКАНУВАННЯ ГАЗОПРОВОДУ

3.1 Територіальне розташування надземного переходу газопроводу

Надземний перехід розташований біля с. Мислівка, Калуського району, Івано- Франківської області.

Схема проходження наземного переходу МГ «ДУД-ІІ» км 26,390 через річку Свіча по Богородчанському ЛВУМГ Долинського ПМ ТОВ «Оператор ГТС України» на місцевості представлена на рис. 4.1.-4.2. Технологічна схема вищезазначеної ділянки МГ наведена на рис. 4.3 як перехід на км 26,4.



Рисунок 3.1. Схема проходження надземного переходу на карті



Рис. 3.2. Схема проходження надземного переходу на місцевості

3.2 Загальні відомості про район виконання робіт

Територія проходження ділянки трубопроводу відноситься до Вигодської територіальної громади, Калуського району, Івано-Франківської області. Івано-Франківська область розташована в трьох різних за своєю природою ландшафтних зонах. Північно-східна частина території (Придністров'я) лежить на Подільській височині. Тут панують лісостепові ландшафти, це західний край лісостепової зони Руської рівнини. Середня частина області розташована в межах Передкарпаття з піднятим і сильно розчленованим рельєфом. Тут панують лісолучні ландшафти переважно з широколистяних лісів - бука, граба, дуба тощо,- які займають високі межиріччя та їх схили. На понижених рівнинах і улоговинах поширені луки. Південно-західна частина Івано-Франківської

області заходить в Українські Карпати, які складаються з серії хребтів, витягнутих у південно-східному напрямку. Значна висота гір (1000-2000 м над рівнем моря) зумовлює сильне зволоження цієї частини області. Більшість гір покрита майже суцільними листяними і хвойними лісами. Три географічні зони Івано-Франківської області утворюють ніби три сходинки, найнижча з яких північна, подільська, середня - передкарпатська і найвища - південна, карпатська. Територія Вигодської територіальної громади відноситься до середньої частини, передгірської частини області між Дністром і Карпатами - височина досить складної орографічної будови, а за геоструктурою до карпатської геосинклінальної області - передкарпатський крайовий прогин, з флювіально-аккумулятивним в зоні прогину типом рельєфу. У геологічній будові Карпатської складчастої області беруть участь інтенсивно дислоковані флішеві відклади крейди та палеогену, виявлені монотонним переверстуванням пісковиків, алевролітів і аргілітів. Карпатську складчасту область від південно-західної окраїни Руської платформи відділяє область інтенсивного неогенового прогинання - Передкарпатський крайовий прогин заповнений потужною (4-5 км) товщею міоценових молас. За характером геологічної будови прогин ділиться на дві зони: а) Зовнішню, яка утворилась на палеозойських і мезозойських відкладах Волино-Подільського закінчення Руської платформи та стародавніх складчастих структурах, що облямовують її з південного заходу; б) Внутрішню, яка утворилась на складчастій флішевій основі. На території південно-західної окраїни Руської платформи найбільш древні утворення представлені кристалічними породами. Поблизу Карпат відкладався найбільш грубоуламковий, але все ж таки обкатаний, матеріал, який утворив алювіальні, також флювіогляціальні товщі валунно-галечників та гравійно-суглинистих відкладів, що перекрили грубою (20-40 м) поволокою більшість площі Передкарпаття. Акумуляція флювіогляціалу і алювію відбувалась з певними перервами: то посилення, то послаблення її, що було пов'язано як з кліматичними змінами, так і з тектонічними рухами в Карпатах і Передкарпатті. В Калуському районі такі основні типи і відміни ґрунтів: 1) дерново-

підзолисто-глеєві; 2) опідзолені ґрунти; 3) лучно-болотні; 4) болотні; 5) торфовища низинні; 6) дернові. Географічне розміщення цих типів і відмін ґрунтів підпорядковується певним закономірностям, а саме: дерново-підзолисто-глеєві та дернові ґрунти є переважно на Передкарпатті, на древніх і молодих терасах, які утворюють рельєф цієї зони; лучно-болотні, болотні ґрунти та торфовища поширені переважно в долинах річок, на їх заплавах.

Поверхневі води Калуського району - це переважно ріки, води яких належать до басейну Дністра, по структурі має пір'ясту будову. Сітка правих і лівих притоків Дністра, в зв'язку з особливостями рельєфу і клімату цих районів, розвинена нерівномірно. Найбільш розвинена сітка правих притоків, які формуються у щедро зрошуваних атмосферними опадами Карпатах. Ці ріки мають досить розгалужену систему, особливо в гірській частині. На Карпатські притоки припадає близько 70% водозбірної площі басейну Дністра.

Клімат Івано-Франківської області має перехідний характер від помірно теплого вологого Західно-Європейського до континентального Східно-Європейського. Області властива вертикальна біокліматична поясність, що визначає лімітуючі чинники для розвитку природних біоценозів. З висотою над рівнем моря змінюється тепловий режим і режим зволоження, суми активних температур (сума температур вище + 10°C), а також кількість днів із сприятливими типами погоди. На території області виділено такі кліматичні райони: 1. Наддністрянський (з підрайонами: лівобережний, правобережний). 2. Південно-східний. 3. Передгірний. 4. Гірський. Надземний перехід МГ «ДУД-П» км 26,390 знаходиться в передгірному кліматичному районі.

До нього входять Калуський, Івано-Франківський, Надвірнянський (північні частини) і Косівський адміністративні райони. Цей район характеризується сумою активних температур 22-25°, кількістю опадів за теплий період - 500-550 мм (за рік - 630-900 мм). Середня тривалість безморозного періоду дорівнює 150-170 днів, вегетаційного - 190-215 днів. Весняні приморозки припиняються в середньому наприкінці квітня або на початку травня, а перші приморозки восени настають в середині вересня. Число

днів із сніговим покривом в окремі багатосніжні зими досягає 105, а в малосніжні зменшується до 60-70. Середня висота снігового покриву дорівнює 15-20 см.

3.6 Сканування трубопроводу

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 3.3 - 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 мм + 10 мм на 50 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.

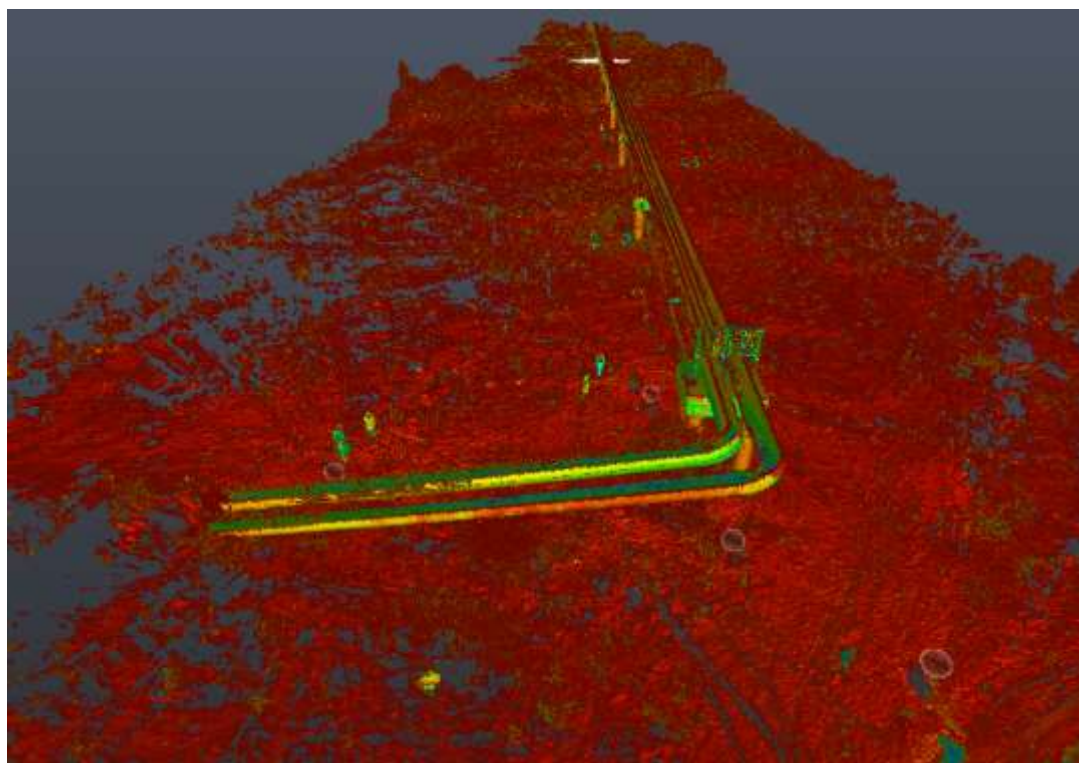
Таблиця 3.1 - Технічні характеристики лазерного сканера LeicaScanStation P40

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

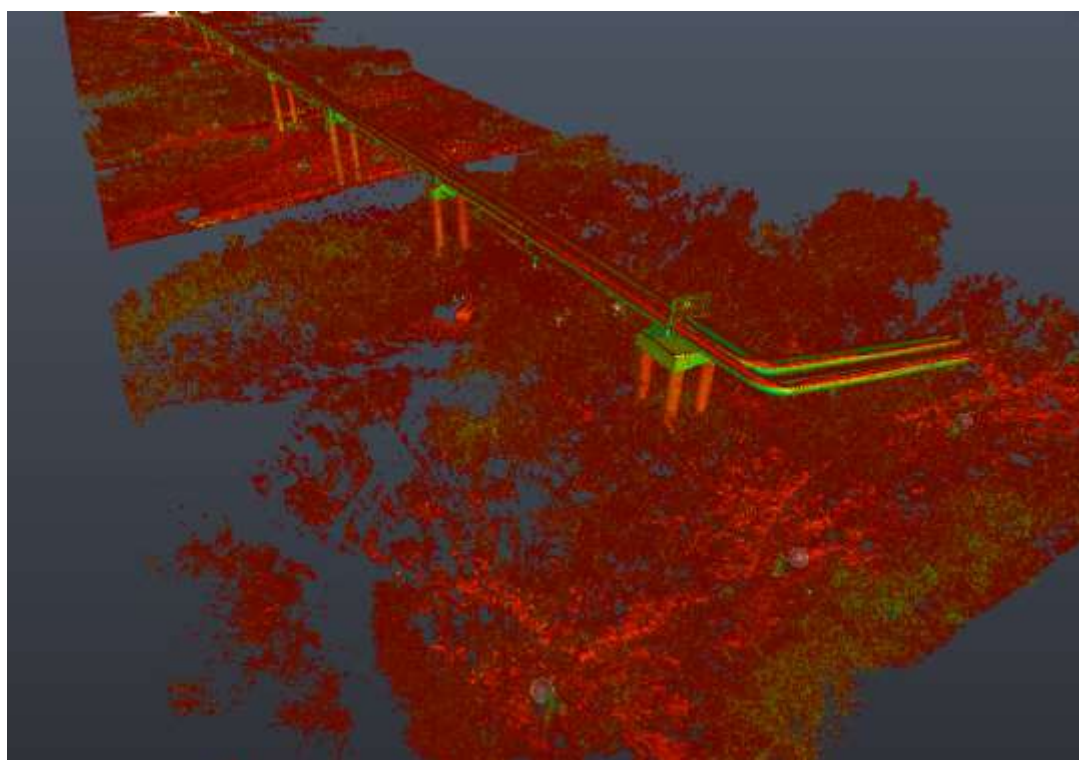
Лазерний сканер оснащений високошвидкісним відбивачем, лазерним далекоміром і системою зміни напрямку променю лазера – спеціальним поворотним дзеркалом. Для отримання детальної зйомки об'єкта були задані ділянки сканування (сектори повороту дзеркала) і крок сканування в кожному напрямку. Польові роботи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



a)



б)

Рисунок 3.4 - 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.

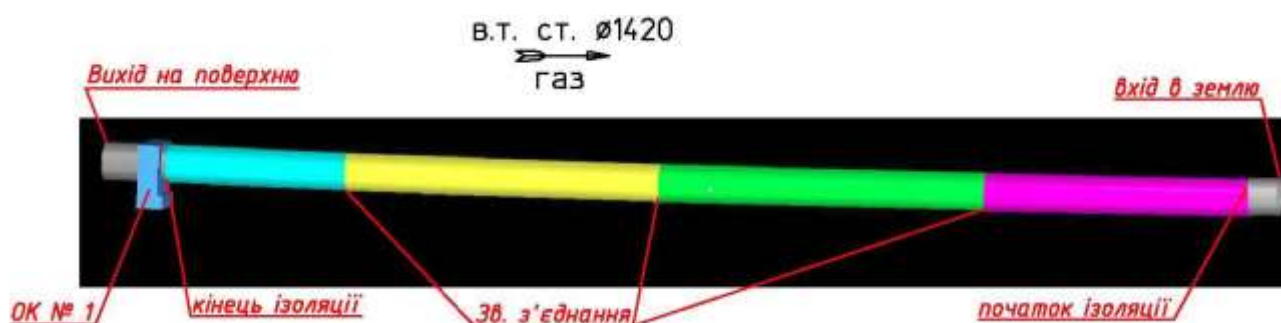
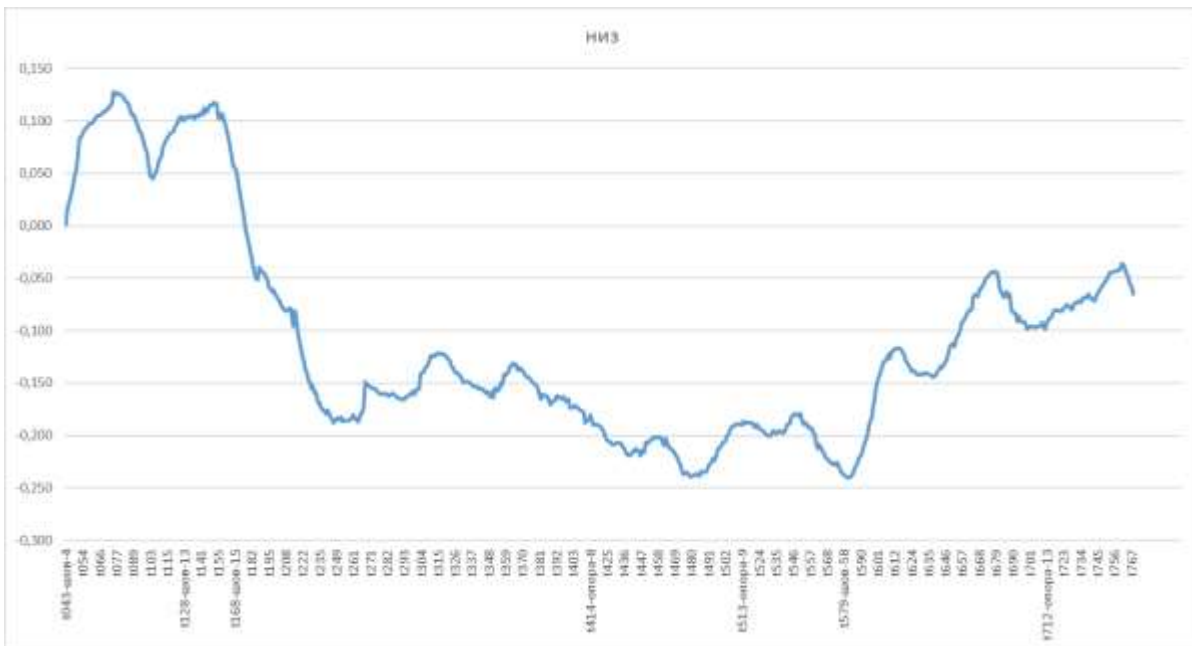


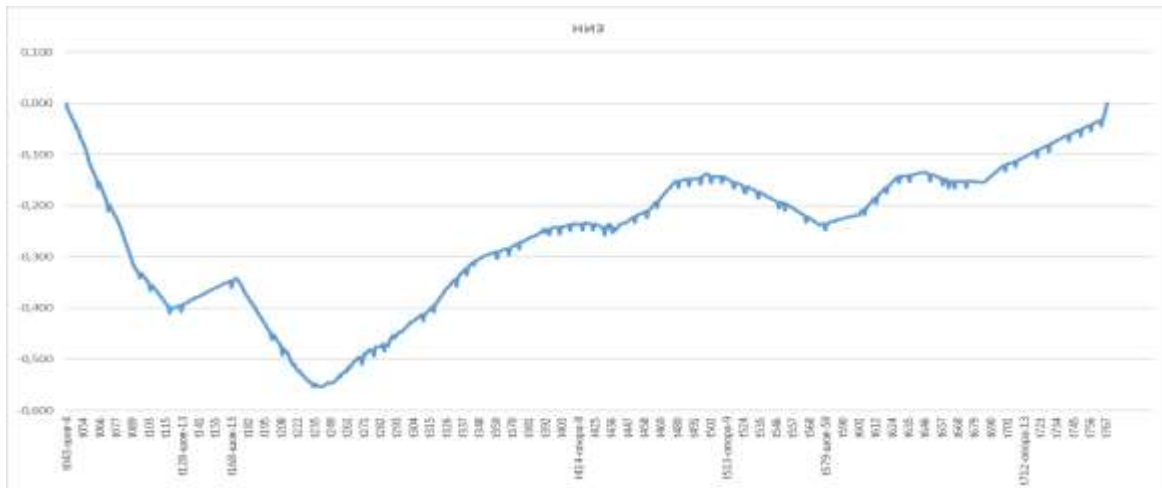
Рисунок 3.5 - Модель переходу лазерного 3D сканування

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.



а)



б)

Рисунок 3.6 – 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.

3.6 Загальні відомості про район виконання робіт

Під час проведення топографо-геодезичних обстежень було визначено, що фактичне положення газопроводу від умовної осі у вертикальній площині має прогин вниз на ділянці від виходу з ґрунту до пригрузу, максимальне значення якого - 0,005 м (на відстані 2,26 м від виходу газопроводу із ґрунту по ходу газу) та прогин вниз на ділянці від пригрузу до входу в ґрунт, максимальне значення якого 0,144 м (на відстані 22,22 м від виходу газопроводу із ґрунту по ходу газу). У горизонтальній площині трубопровід має відхилення вправо, на ділянці від виходу з землі до пригрузу, максимальне значення якого 0,037 м (на відстані 2,26 м від виходу газопроводу із ґрунту по ходу газу) та відхилення вправо на ділянці від пригрузу до входу в ґрунт, максимальне значення якого 0,051 м (на відстані 18,37 м від виходу газопроводу із ґрунту по ходу газу).

За результатами вимірювань побудований план та профіль надземного переходу (додаток В).

Спостереження за горизонтальними та вертикальними відхиленнями надземного переходу від умовної осі наведено в додатку В:

горизонтальні відхилення осі газопроводу на ділянці вихід з землі – пригруз знаходяться в межах (-0,016 ÷ -0,037 м);

горизонтальні відхилення осі газопроводу на ділянці пригруз – вхід в землю знаходяться в межах (-0,051 ÷ 0,049 м);

вертикальні відхилення осі газопроводу на ділянці вихід з землі – пригруз знаходяться в межах (-0,005 ÷ 0,004 м);

вертикальні відхилення осі газопроводу на ділянці пригруз – вхід в землю знаходяться в межах (-0,144 ÷ -0,011 м);

Глибина залягання труби в межах допустимих норм - додаток Р.

Аналіз результатів геодезичних вимірювань розглянутої ділянки свідчить про відсутність суттєвого відхилення фактичної осі трубопроводу від його умовної осі.

Максимальний допустимий розрахунковий прогин:

- на ділянці від входу з ґрунту до ОК№1 0,0061 м, а фактична величина максимального прогину по результатам топографо-геодезичних обстежень становить 0,005 м (додаток Г), що не перевищує розрахункового максимального прогину;

на ділянці від ОК№1 до входу МГ в ґрунт 0,5797 м, а фактична величина максимального прогину по результатам топографо-геодезичних обстежень становить 0,144 м (додаток Г), що не перевищує розрахункового максимального прогину;

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 обгрунтованим для підвищення рівня безпеки та прогнозованості функціонування газотранспортної системи України, особливо в умовах воєнних загроз і техногенних викликів..

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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. Олесків, 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. Božić F., Analysis of Changes in Natural Gas Physical Flows for Europe via Ukraine in 2020/ Božić F., Karasalihović D. Sedlar, Smajla I. I. Ivančić 2021 , 14 (16), 5175; <https://doi.org/10.3390/en14165175>.

7. Abolhosseini, S., Heshmati, A., Rashidghalam, M.: Energy security and competition over energy resources in Iran and Caucasus region. *AIMS Energy* 5(2), 224–238 (2017). doi:10.3934/energy.2017.2.224
8. 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>
9. Олесків, 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. Чернова О. Т. Аналіз розвитку мережі підземних сховищ газу України / О.Т. Чернова // Розробка родовищ: Зб. наук. пр. — 2014. — Т. 8. — С. 261-276.
14. 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>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s44245-025-00102-w>

15. 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>
16. Олесків, 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>
17. 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>

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи «МОНІТОРИНГ ДЕФОРМАЦІЙ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-СКАНУВАННЯ».

Обсяг пояснювальної записки 41 аркушів.

Перелік графічних додатків:

1. Модель переходу лазерного 3D сканування
2. Хмари точок 3D сканування
3. Діаграма деформацій

_____ .2025
