

© Ю.О. Заболотна¹, О.О. Азюковський¹, В.О. Расцветаєв¹,
О.С. Кучин¹, М.В. Бабенко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

КОНЦЕПЦІЯ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ МЕТОДІВ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ТА СПОРУДЖЕННІ ПЕРЕТИНІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ІЗ ЗАЛІЗНИЧНИМИ КОЛІЯМИ

© Yu. Zabolotna¹, O. Aziukovskyi¹, V. Rastsvietaiev¹,
O. Kuchyn¹, M. Babenko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE CONCEPT OF APPLICATION MODERN GEODETIC METHODS IN DESIGNING AND CONSTRUCTING CROSSINGS MAIN PIPELINES WITH RAILWAY TRAILS

Мета. Дослідити потенціал сучасних геодезичних технологій у проєктуванні переходів трубопроводів через залізничні колії, проаналізувати їх ефективність порівняно з традиційними методами та надати практичні рекомендації щодо оптимального застосування GNSS, LiDAR, ГІС і БПЛА у проєктних роботах.

Методика. Для досягнення мети проведено аналіз застосування сучасних геодезичних технологій у будівництві, порівняння традиційних і новітніх методів за ключовими параметрами, узагальнено досвід використання GNSS, LiDAR, ГІС і БПЛА при проєктуванні трубопроводів та сформульовано практичні рекомендації залежно від умов місцевості.

Результати. Сучасні геодезичні методи знімання підвищують точність вимірювань до 1–2 см (проти 5–10 см традиційних) і скорочують тривалість польових робіт із 5–7 до 1–2 діб залежно від площі. Вибір методики залежить від багатьох факторів: потрібної точності, рельєфу, погодних умов, щільної забудови, природних перешкод, блокування сигналів GNSS і доступності місця. Безтраншейне прокладання трубопроводів ефективно використовує цифрове моделювання рельєфу, що знижує проєктні ризики, витрати та екологічний вплив.

Наукова новизна. У межах дослідження вперше на системному рівні встановлено нові закономірності, що визначають взаємозв'язок між рівнем впровадження сучасних геодезичних технологій (GNSS, LiDAR, ГІС, БПЛА) та ефективністю проєктування переходів трубопроводів через залізничні колії. Виявлено, що їх комплексне застосування забезпечує п'ятикратне підвищення точності вимірювань, скорочення тривалості польових робіт на 20–70 %, а також оптимізацію витрат, підвищення безпеки та зниження екологічного навантаження. Розвитку набув науковий підхід до цифровізації геодезичних процесів, зокрема створення цифрових моделей місцевості для інфраструктурного проєктування. Обґрунтовано причинно-наслідковий зв'язок між рівнем технологічної інтеграції та якістю проєктних рішень, що формує основу для оновлення галузевих стандартів.

Практична значимість. Результати можуть бути використані проєктними й будівельними організаціями для підвищення точності інженерних вишукувань, у плануванні екологічно безпечних інфраструктурних проєктів і в освітньому процесі як приклад сучасних проєктних методик.

Ключові слова: сучасні геодезичні методи, GNSS, LiDAR, ГІС, БПЛА, трубопровід, залізниця, безтраншейні технології, цифрова модель, інфраструктура, точне проєктування.

Вступ. Залізничні колії та магістральні трубопроводи є важливими елементами національної та міжнародної інфраструктури, які забезпечують транспортування великої кількості ресурсів і матеріалів на значні відстані. Ці дві системи є невід'ємною частиною економічного розвитку та функціонування багатьох галузей, таких як енергетика, сільське господарство, хімічна та нафтова промисловість. Залізничні колії забезпечують ефективне переміщення вантажів і пасажирів, а магістральні трубопроводи транспортують рідкі та газоподібні речовини, включаючи нафту, природний газ, воду та інші ресурси, що мають велике значення для забезпечення енергетичної та ресурсної безпеки країни [1].

Однак проєктування перетинів цих двох інженерних систем, тобто місць, де трубопроводи перетинають залізничні колії або проходять паралельно їм, є надзвичайно складною інженерною задачею. Вона вимагає комплексного підходу, оскільки потрібно враховувати низку різноманітних факторів. Технічні аспекти включають забезпечення точного розташування трубопроводів і залізничних колій, правильне визначення глибини закладання трубопроводів, а також вибір оптимальних конструкцій, що дозволяють забезпечити безперервність роботи обох систем. Екологічні фактори враховують необхідність мінімізації впливу на навколишнє середовище при прокладанні трубопроводів, а також при будівництві залізничних переходів [2]. Окрім того, важливою є економічна складова, оскільки обидва ці інфраструктурні об'єкти потребують значних капіталовкладень, тому проєктування має бути максимально ефективним з точки зору витрат [3].

Основою для проєктування та будівництва будь-яких будівель, споруд та їх комплексів є топографічні карти місцевості переважно масштабів 1:500, які створюються за результатами геодезичних знімів. Традиційно такі знімання виконують способом тахеометричної зйомки ділянки за допомогою оптичних теодолітів, тахеометрів та рейок. Для забезпечення високої точності, безпеки та економічної ефективності таких проєктів, необхідно застосовувати передові технології та інструменти, зокрема сучасні геодезичні методи. Використання геодезії у проєктуванні таких перетинів дозволяє значно знизити ймовірність помилок при визначенні координат, висотних відміток та інших важливих параметрів, а також сприяє скороченню часу виконання робіт і зменшенню витрат на будівництво [4]. Технології, що використовуються в геодезії, дозволяють швидко й точно отримувати просторові дані місцевості, обробляти їх і створювати високоточні моделі для подальшого використання в проєктуванні [5].

Актуальність цієї теми, зокрема застосування сучасних геодезичних методів, обумовлена кількома факторами. По-перше, існує підвищена вимога до точності та якості проєктування при розробці проєктів переходів трубопроводів через залізничні колії, оскільки будь-які неточності можуть призвести до серйозних технічних та економічних наслідків. Проєктування таких перетинів вимагає врахування не лише інженерних вимог, але й екологічних та соціальних аспектів. По-друге, необхідність оптимізації витрат на будівництво та експлуатацію об'єктів стає дедалі більшою, оскільки економічні умови змушують скорочувати витрати на всі етапи життєвого циклу проєктів. Тому використання сучасних геодезичних технологій стає важливим елементом в досягненні цієї мети.

Найбільш важливими інструментами, які активно використовуються у сучасних геодезичних методах, є GNSS, лазерне сканування (LiDAR), БПЛА та ГІС. Кожен з цих методів має свої унікальні переваги, що дозволяють розв'язувати різноманітні завдання з високою точністю.

Один із ключових аспектів, на якому ґрунтується ефективність геодезичних методів, – це здатність забезпечити необхідну точність вимірювання та детальну карту місцевості в певному масштабі. Завдяки сучасним геодезичним технологіям, таким як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), лазерне сканування (LiDAR), безпілотні літальні апарати (БПЛА) і геоінформаційні системи (ГІС), з'являється можливість створення детальних карт і 3D-моделей місцевості, що значно покращує якість проєктування та дозволяє уникнути помилок при виборі оптимальних рішень [6].

Метою цієї роботи є дослідження застосування сучасних геодезичних методів, таких як GNSS, лазерне сканування, БПЛА та ГІС, для проєктування переходів магістральних трубопроводів через залізничні колії. Завданнями дослідження є: вивчення принципів роботи кожного з методів, аналіз їх застосування в практичних інженерних задачах, а також розробка рекомендацій щодо їх найбільш ефективного використання в умовах проєктування таких складних інфраструктурних об'єктів.

Робота дозволить детально розглянути кожен із сучасних геодезичних методів, виявити їх переваги та обмеження в контексті проєктування переходів трубопроводів через залізничні колії, а також запропонувати практичні рекомендації для інженерів, проєктувальників та інших фахівців, які працюють у цій галузі.

Основна частина. У сучасному будівництві трубопроводів та залізничних переходів геодезичні роботи відіграють одну з найважливіших ролей, оскільки забезпечують точність проєктування, правильне визначення геометрії території та мінімізацію ризиків при реалізації складних інженерних проєктів [7]. Сучасні геодезичні методи дозволяють значно підвищити якість проєктування та будівництва, адже вони забезпечують високоточне вимірювання, необхідне для того, щоб трубопроводи правильно перетинали залізничні колії, враховуючи всі технічні вимоги та характеристики, такі як глибина закладання, конструкційні особливості та навантаження на об'єкт [8].

Вивчення наявних наукових досліджень та практичного досвіду у сфері геодезії дозволяє визначити кілька ключових напрямів застосування геодезичних методів у будівництві трубопроводів та залізничних переходів [7, 9]. Одним з найважливіших аспектів є використання новітніх технологій для забезпечення високої точності, що критично важливо при проєктуванні переходів трубопроводів через залізничні колії, де точність визначення координат та висотних відміток може мати великий вплив на безпеку та ефективність будівельних робіт [10].

Одним із найбільш революційних досягнень у геодезії стали глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), які активно інтегруються у процеси будівництва та проєктування. Ці системи дозволяють здійснювати високоточне позиціонування в реальному часі, що є необхідним для забезпечення точності визначення координат і висот при прокладанні трубопроводів і побудові залізничних

колій. За допомогою GNSS, координати точок на місцевості можна визначати з точністю до сантиметра, що надзвичайно важливо при проектуванні переходів трубопроводів через залізничні колії. Використання GNSS дозволяє не тільки досягти високої точності, але й значно скоротити час, необхідний для вимірювань, порівняно з традиційними методами. Це, в свою чергу, зменшує витрати на польові роботи та підвищує ефективність реалізації проєкту [11].

Ще однією важливою технологією, що дозволяє суттєво покращити якість проектування та будівництво трубопроводів і залізничних переходів, є використання лазерних сканерів з технологією LiDAR. LiDAR (Light Detection and Ranging) є методом, що використовує лазерне випромінювання для вимірювання відстаней до об'єктів та створення детальних 3D-моделей місцевості. За допомогою LiDAR можна точно картографувати території з високою роздільною здатністю, що дозволяє отримати точні дані про рельєф місцевості, геометрію існуючих об'єктів і визначити найкращі точки для закладання трубопроводів [12]. Швидкість лазерного сканування досягає 1 млн. точок на секунду.

Ця технологія дає можливість візуалізувати всю місцевість у вигляді тривимірних моделей, що дозволяє виявити потенційно небезпечні або проблемні зони. Таким чином, LiDAR дозволяє значно підвищити ефективність проектування, оскільки інженери мають можливість працювати з точними просторовими даними території, що дозволяє здійснити більш обґрунтований вибір для розміщення трубопроводів і зменшити ризики під час будівництва [13].

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, відкривають нові можливості для дистанційного знімання важкодоступних місць і картографування ділянок, де прокладаються трубопроводи. БПЛА дозволяють отримувати аерофотознімки великих територій, які неможливо або надзвичайно складно обстежити за допомогою традиційних геодезичних методів [14, 15]. Використання дронів для створення карт і 3D-моделей місцевості дозволяє здійснювати моніторинг будівництва, контролювати стан трубопроводів і виявляти потенційно небезпечні зони, що може знизити витрати на роботи та зменшити час, необхідний для збору просторових даних [16].

Поєднання цих технологій створює потужний інструмент для проектування. Геодезичні методи, такі як GNSS, LiDAR, БПЛА та ГІС, не лише підвищують точність вимірювань і зменшують час на знімання даних, але й дозволяють створювати інтегровані моделі, що враховують усі параметри проєкту – від рельєфу місцевості до специфікацій конструкцій [17]. Завдяки цьому стає можливим ефективно вирішувати проблеми, що можуть виникнути в процесі проектування та будівництва, знижувати ризики та витрати, а також підвищувати якість і безпеку інфраструктурних проєктів [18].

Вибір безтраншейного способу спорудження магістральних трубопроводів залежить від діаметра і довжини кожуха, фізико-механічних властивостей та гідрологічних умов розроблюваних ґрунтів. Вибір способу також залежить від наявності в будівельних організацій відповідних продавлювальних та бурових агрегатів, установок і обладнання. Для полегшення вибору можна скористатись рекомендаціями наведеними у [19].

Геоінформаційні системи (ГІС) є потужним інструментом для обробки та аналізу просторових даних. Використання ГІС дозволяє інтегрувати дані з різних джерел у єдину інформаційну модель, що дозволяє створювати детальні цифрові карти, на яких відображаються всі інженерні та природні об'єкти, що можуть впливати на проектування. У контексті проектування перетинів трубопроводів і залізничних колій, ГІС використовується для аналізу різних варіантів проектних рішень, моделювання ситуацій, що дозволяє оптимізувати маршрути прокладання трубопроводів і знизити ризики при будівництві [14].

Завдяки ГІС можна також виконувати просторові аналізи, оцінюючи вплив проектів на навколишнє середовище, наприклад, аналізуючи зони затоплення чи території, які можуть бути задіяні в процесі будівництва.

Важливо також зазначити, що необхідність використання сучасних геодезичних засобів виникає не лише на стадії проектування, а й у процесі експлуатації трубопровідних систем. Це зумовлено потребою у постійному моніторингу технічного стану об'єктів як трубопровідного, так і залізничного призначення з метою забезпечення їх стабільної та безпечної експлуатації.

GNSS – це система, яка використовує сигнали від супутників для точного визначення координат на земній поверхні. Вона є основою для геодезичних вимірювань, оскільки дозволяє визначати точні координати об'єктів в реальному часі (рис. 1). Одним з найбільш інноваційних підходів є використання технології RTK (Real-Time Kinematic), яка дозволяє отримати точність до 1–2 см у реальному часі. Це досягається завдяки використанню базових станцій, які надають диференціальні поправки для забезпечення точності визначення тривимірних координат у місцевій системі.

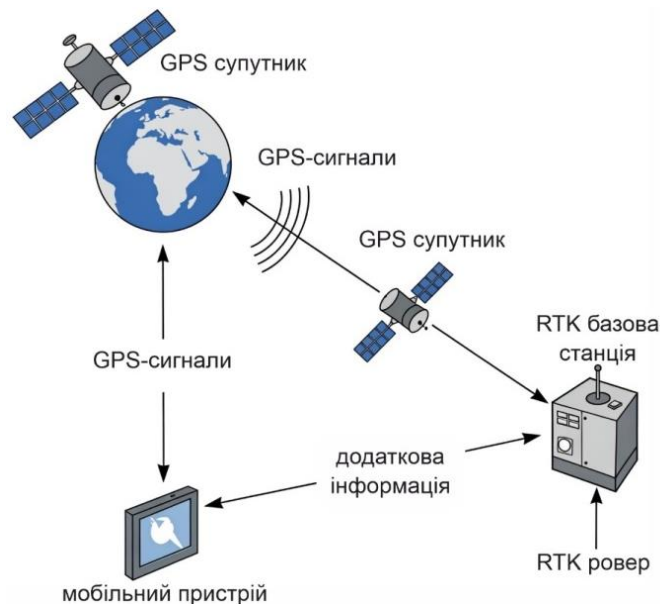


Рис. 1. Приклад застосування системи GNSS

Перевагою використання GNSS-знімання є можливість оператора самому встановлювати характерні точки зйомки відповідно до завдання, помірна вартість обладнання, найкоротший час обробки; недоліком – більш тривалий час

знімання та трудовитрати (в порівнянні з БПЛА та лазерним скануванням), залежність від техногенних та природніх перешкод.

LiDAR (лазерне сканування) є одним із найбільш потужних інструментів для створення детальних і точних тривимірних моделей місцевості. За допомогою лазерних імпульсів LiDAR дозволяє отримувати інформацію про об'єкти на земній поверхні з високою точністю. Це дає змогу створювати щільні цифрові моделі місцевості, що є важливими для проєктування трубопроводів і залізничних колій, особливо в складних рельєфних умовах (рис. 2).

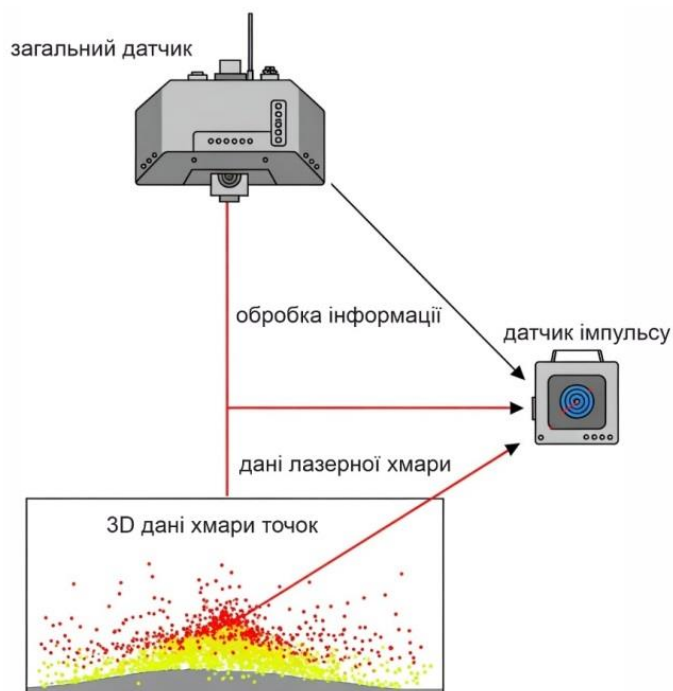


Рис. 2. Приклад застосування LiDAR

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це ще один важливий інструмент у сучасній геодезії, який розширює можливості для знімання важкодоступних ділянок місцевості. Завдяки здатності підніматися на великі висоти, БПЛА можуть здійснювати аерофотозйомку, що дозволяє отримати високоякісні зображення великих територій з великою деталізацією. Ця технологія особливо корисна на етапі проєктування перетинів трубопроводів і залізничних колій, де необхідно швидко отримати карти або моделі топографічної поверхні ділянки (рис. 3).

Дрони з високоякісними камерами можуть проводити не лише фотозйомку, але й відеозйомку та тепловізійне знімання, що дає можливість отримати більш комплексну інформацію про об'єкти на місцевості.

Завдяки можливості швидкого збору даних БПЛА стали незамінними в проєктах, де потрібна швидка реакція на зміни місцевості або для виконання моніторингу за великими територіями.

Для знімання місцевості використовуються БПЛА напівпрофесійного, професійного та геодезичного класів застосування. Останні комплектуються системами RTK або RTK+LiDAR, що значно підвищує точність виконання знімання та час на підготовчі роботи.



Рис. 3. Приклад застосування БПЛА при аерофотозйомці для отримання високоякісних зображень великих територій з великою деталізацією

До недоліків використання БПЛА та лазерного сканування є поверхні, насичені низькою та високою рослинністю, яка створює так звані «шуми» і не дозволяє точно встановити реальну топографічну поверхню верхнього шару ґрунту.

Точність знімання з використанням БПЛА залежить від правильного проектування польотного завдання: висота зйомки, технічні характеристики камери та її роздільна здатність.

Розрахунок основних параметрів польоту БПЛА, що забезпечує взаємозв'язок розміру GSD та висоти зйомки визначається формулою:

$$GSD = \frac{S_w \cdot H \cdot 100}{F_r \cdot imW}, \quad (1)$$

де GSD – розмір пікселя в проекції на земну поверхню, см/піксель; S_w – ширина сенсора камери, мм; F_r – фокусна відстань, мм; H – висота знімання (польоту), м; imW – ширина кадру (знімка), пікселів.

Рекомендовані значення GSD для різних масштабів знімання наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Рекомендовані значення GSD для різних масштабів знімання

Масштаб плану	GSD , см/піксель
1:500	0,035
1:1000	0,07
1:2000	0,14
1:5000	0,35

Останнім кроком виконання топографічного знімання є створення електронної ГІС-карти місцевості та/або її тривимірної моделі. Геоінформаційні системи (ГІС) є незамінним інструментом для збору, зберігання, обробки та аналізу просторових даних. Вони дозволяють створювати інтегровані картографічні

моделі, які використовуються для управління та аналізу інформації про території. Для проектування переходів трубопроводів через залізничні колії ГІС стають особливо корисними, оскільки дозволяють створювати цифрові карти, на яких можна поєднати дані, отримані з різних джерел, таких як GNSS і LiDAR, а також враховувати інші фактори – від екологічних до технічних (рис. 4).



Рис. 4. Приклад застосування ГІС

ГІС дозволяють інженерам виконувати різноманітні просторові аналізи, такі як визначення оптимальних шляхів прокладання трубопроводів, аналіз впливу будівництва на навколишнє середовище, прогнозування потенційних проблемних зон і навіть оптимізацію варіантів проєктних рішень. ГІС дають змогу інтегрувати дані з різних джерел, таких як аерофотознімки, дані з LiDAR і GPS, що дає змогу побудувати комплексну модель території для подальшого проєктування.

Використання ГІС допомагає не лише при проєктуванні, але й в процесі моніторингу та експлуатації об'єктів. Прогнозування змін у місцевості або аналіз зон можливих підтоплень, землетрусів або інших природних явищ дозволяє заздалегідь врахувати ці фактори у проєкті та зменшити ризики для трубопроводів і залізничних колій.

Процес збору даних є першим і надзвичайно важливим етапом, оскільки точність інформації, отриманої на початкових етапах проєктування, безпосередньо впливає на якість подальших розрахунків і проєктних рішень. Використання GNSS (Глобальних навігаційних супутникових систем) для визначення координат точок на місцевості дозволяє досягти високої точності вимірювань. Завдяки використанню систем RTK (Real-Time Kinematic), GNSS може забезпечити точність вимірювань до 1–2 см в реальному часі, що критично важливо для визначення точних меж перетину трубопроводів із залізничними коліями.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) також відіграє важливу роль на етапі збору даних. БПЛА оснащені високоякісними камерами та сенсорами, що дають змогу здійснювати аерофотозйомку великих територій, особливо в районах з обмеженим доступом для традиційних методів знімання. Дрони дозволяють отримувати детальну інформацію про місцевість і проводити знімання важкодоступних ділянок, зокрема лісистих територій або місць, де традиційні методи не є ефективними або можливими.

Використання GNSS і БПЛА в комплексі з маркуванням точок (опознаків) забезпечує швидке і точне отримання координат на місцевості.

Другим етапом є створення точних тривимірних моделей місцевості, що дозволяє краще уявити рельєф, на якому планується розташування трубопроводів. Одним із основних інструментів для цього є лазерне сканування (LiDAR) та використання результатів знімання БПЛА. LiDAR використовує лазерні імпульси для збору даних про точне розташування об'єктів на земній поверхні та в атмосфері, створюючи цифрову модель місцевості з високою деталізацією. Ці дані дозволяють інженерам і проєктувальникам отримати точні моделі рельєфу, відобразити всі природні та технічні об'єкти на ділянці, такі як існуючі будівлі, дерева, водні об'єкти, а також інші елементи, що можуть впливати на проєктування.

Наступним етапом є інтеграція всіх зібраних даних у Геоінформаційні системи (ГІС). ГІС є потужним інструментом для обробки, зберігання та аналізу просторової інформації. На цьому етапі всі отримані дані – координати, 3D-моделі місцевості, карти та фотознімки – об'єднуються в єдину цифрову модель території, яка використовується для подальшого проєктування.

Інтеграція даних у ГІС дозволяє здійснювати аналізи просторових даних, такі як:

- визначення оптимальних варіантів для проєктування трас трубопроводів, враховуючи природні перешкоди та існуючу інфраструктуру;
- оцінка впливу проєкту на навколишнє середовище, включаючи можливі ризики для флори і фауни, водних ресурсів та ґрунтів;
- моделювання можливих сценаріїв, таких як зміни в рельєфі, підтоплення або природні катастрофи, що можуть вплинути на довговічність та стабільність трубопроводу.

ГІС також дають можливість для проєктувальників здійснювати варіативні розрахунки, порівнюючи різні маршрути і вибираючи найкращий з економічної, екологічної та технічної точки зору.

Порівняльна характеристика між традиційними і сучасними геодезичними методами при проєктуванні та спорудженні перетинів магістральних трубопроводів із залізничними коліями наведено у таблиці 2 (приблизно на 1–2 Га площі ділянки в залежності від складності рельєфу та забудови).

Таблиця 2
Порівняльна характеристика (до і після впровадження сучасних методів)

Параметр	Традиційні методи	GNSS	LiDAR	БПЛА
Тривалість польових робіт	3–5 діб ^{*1}	1 доба	1 доба ^{*2}	1–3 години
Точність знімання ^{*3}	2–10 см	2–4 см	2–5 см	2–10 см
Візуалізація (3D)	Відсутня	Хмара точок	Хмара точок, 3D-модель	Хмара точок, 3D-модель, ортофотоплан
Ризик помилок і переробок	Середній	Мінімізований	Мінімізований	Середній

Примітка: *1 – в залежності від використаного обладнання; *2 – в залежності від відстані сканування певним приладом; *3 – залежить від використаного обладнання та методики виконання геодезичного знімання.

Вибір методики виконання геодезичного знімання ділянки місцевості залежить від багатьох факторів: необхідна точність знімання, погодні умови, рельєф місцевості, щільна високоповерхова забудівля, перешкоди природного характеру (рослинність), блокування сигналів GNSS, можливість безпосереднього знаходження людини на місці зйомки та ін. У таблиці 3 наведені умови використання наведених вище сучасних методів виконання геодезичних знімачь, їх переваг та недоліків.

Таблиця 3

Умови використання переваги та недоліки

Спосіб знімання	Умови використання	Переваги	Недоліки
Традиційний	Будь які умови крім неможливості знаходження у точці зйомки	Низька вартість обладнання	Дуже висока складність і тривалість виконання польових та камеральних робіт
GNSS	Будь які умови крім неможливості знаходження в точці зйомки	Швидка зйомка безпосередньо характерних точок поверхні місцевості, отримання результатів в «полі»	Залежність від зв'язку з супутниками, доступу до глобальної інтернет-мережі. Наявність техногенних або природних перешкод.
Лазерне сканування	Будь які умови, що забезпечують пряму видимість до об'єкту сканування. Вимоги до дальності сканування	Висока швидкість, щільність та точність знімання в польових умовах	Тривалий час обробки, висока вартість обладнання, програмного та апаратного забезпечення для його обробки
БПЛА	Будь які умови, що забезпечують зліт та посадку БПЛА. Правильне визначення висоту польоту в залежності від характеристик БПЛА та камери.	Висока швидкість, щільність та точність знімання в польових умовах	Помірна точність знімання (близько 10 см і вище) крім застосування вартісних геодезичних моделей Тривалий час обробки, висока вартість обладнання, програмного та апаратного забезпечення для його обробки

За результатами порівняння між традиційними і сучасними геодезичними методами пропонується алгоритм, який передбачає раціональний розподіл часу та загальних витрат при проектуванні та спорудженні перетинів магістральних трубопроводів із залізничними коліями (рис. 5).

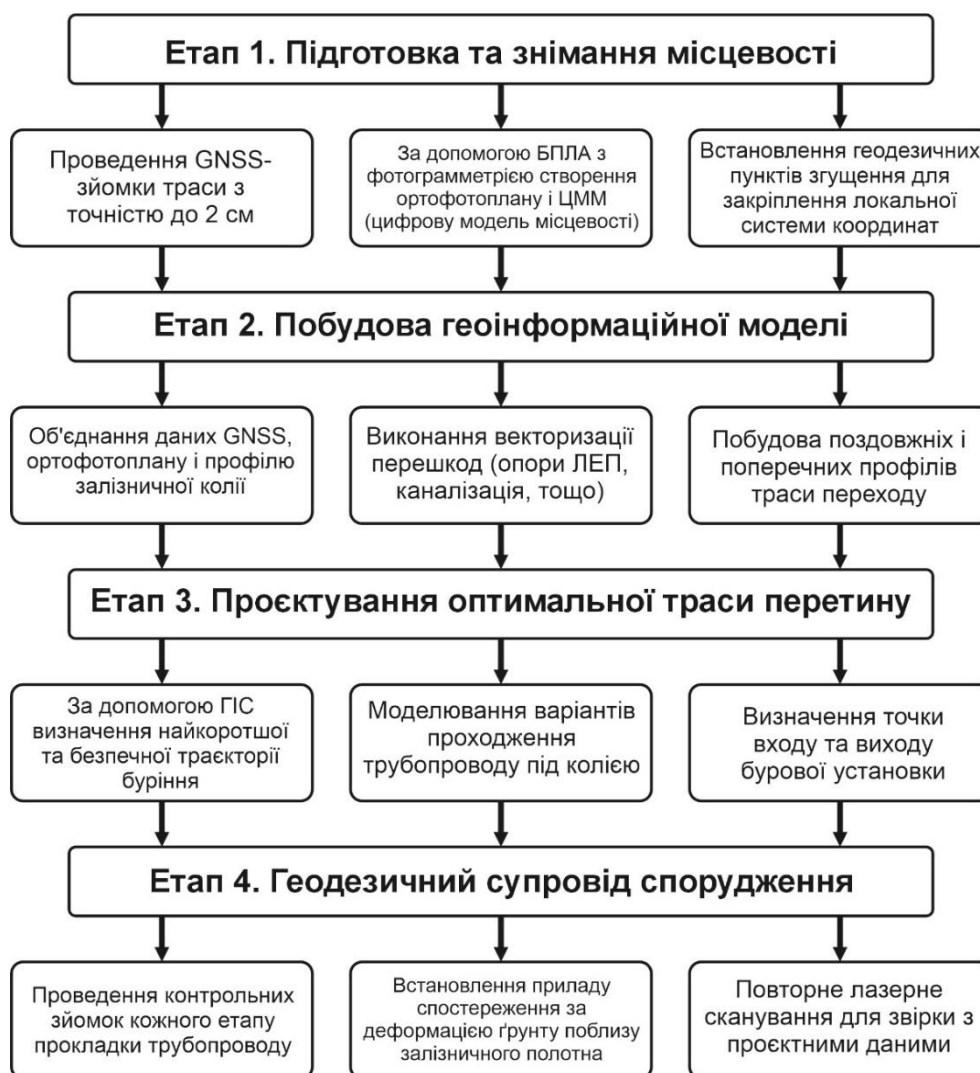


Рис. 5. Алгоритм геодезичного забезпечення концепції застосування сучасних геодезичних методів при проєктуванні перетинів магістральних трубопроводів із залізничними коліями

Одним із головних обмежень є висока вартість обладнання для геодезичних вимірювань. Технології, такі як GNSS, LiDAR, БПЛА та ГІС, вимагають значних інвестицій у спеціалізоване обладнання та програмне забезпечення. Наприклад, високоточні геодезичні лазерні сканери можуть коштувати десятки-сотні тисяч доларів, що робить їх доступними не для всіх компаній, особливо для малих та середніх підприємств.

Застосування таких технологій вимагає наявності висококваліфікованих фахівців, здатних працювати з сучасними геодезичними приладами та програмним забезпеченням. Навчання та сертифікація таких спеціалістів є додатковими витратами для компаній.

Деякі геодезичні методи можуть бути менш ефективними в умовах поганих погодних або складних географічних умов. Наприклад, для БПЛА існують обмеження по висоті польотів та швидкості вітру, що може ускладнити роботу в несприятливих погодних умовах.

Висновки. Сучасні геодезичні методи стають основою для ефективного проєктування трубопроводів в межах їх перетинку з залізничними коліями, дозволяючи не лише знизити витрати на будівництво, але й забезпечити стабільну роботу об'єктів інфраструктури та мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Застосування сучасних геодезичних методів на етапі проєктування переходів трубопроводів через залізничні колії не лише забезпечує високу точність (збільшується приблизно в 5 разів) і швидкість робіт (тривалість робіт зменшується на 20–70%), але й дозволяє значно підвищити безпеку та ефективність проєктування, оптимізувати витрати і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Визначення оптимальних варіантів використання геодезичних методів залежить від багатьох факторів, включаючи бюджет, специфіку місцевості та технічні вимоги.

Перелік посилань

1. Данько, М.І., Бутько, Т.В., Кулешов, В.М., Березань, О.В., Гребцов, О.І., Зонов, В.Д., Малахова, О.А., Ткачов, Ф.Г., & Лаврухін, О.В. (2007). *Загальний курс та технології роботи транспорту (залізничний транспорт) : навчальний посібник*. УкрДАЗТ.
2. Осетрін, М.М. (2021). *Інженерне облаштування міських вулиць та доріг: навчальний посібник*. КНУБА.
3. Гавриш, О.А., Дергачова, В.В., Кравченко, М.О., Ситник, Н.І., Жигалкевич, Ж.М., Бояринова, К.О., Гук, О.В., Мохонько, Г.А., Дергачов, Є.В., & Копішинська, К.О. (2019). *Менеджмент стартап проєктів : підручник для студентів технічних спеціальностей другого (магістерського) рівня вищої освіти*. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка».
4. Войтенко, С.П., Шульц, Р.В., Самойленко, О.М., Адаменко, О.В., Терещук, О.І., Старовєров, В.С., & Кузьмич, О.Й. (2022). *Інженерна геодезія : підручник*. НУ «Чернігівська політехніка».
5. Казаченко, Л., Казаченко, Д., Завальний, О., Коваленко, Л., & Наливайко, Т. (2022). Сучасні геодезичні вимірні системи та ГІС-технології у плануванні та 3D-моделюванні лінійних споруд. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Інженерна геодезія*, 1(43), 62–70. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-43-62-70>
6. *Інноваційні методи проєктних та геодезичних робіт : Матеріали 83-ї міжнародної студентської конференції*. (2021). Харків : ХНАДУ.
7. *Інноваційні методи проєктних та геодезичних робіт : Матеріали 86-ї міжнародної студентської конференції*. (2024). Харків : ХНАДУ.
8. Парахненко, В.Г., Кисельов, Ю.О., Рудий, Р.М., Шемякін, М.В., & Прокопенко, Н.А. (2024). Сучасні методи геодезичних вимірювань у будівництві. *Наука і техніка сьогодні: Серія «Техніка»*, 9(37), 733–741. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-9\(37\)-733-741](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-9(37)-733-741)
9. Розум, Р.І., Буряк, М.В., Вітровий, А.О., Волошин, Р.В., Любезна, І.В., Язлюк, Б.О., Бутов, А.М., Гулько, Р.Й., Гуменний, М.І., & Голик, Л.Р. (2020). *Геодезія та землеустрій: монографія*. ТНЕУ.
10. *Молодь: наука та інновації : матеріали X Міжнародної науковотехнічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*. (2022). Дніпро : НТУ «ДП».
11. Савчук, С., Проданець, І., & Федорчук, А. (2022). Застосування методики визначення координат за даними GNSS-спостережень із прив'язкою до мережі активних референціальних станцій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. Геодезія та геодинаміка*, 1(43), 48–54. <https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-43-48-54>
12. *Геофорум-2020 : Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції*. (2020). Львів : Видавництво Львівської політехніки.

13. Байрак, Г. (2018). *Методи геоморфологічних досліджень : навчальний посібник*. ЛНУ ім. Івана Франка
14. Зацерковний, В.І., Бурачек, В.Г., Железняк, О.О., & Терещенко, А.О. (2014). *Геоінформаційні системи і бази даних : монографія*. НДУ ім. М. Гоголя.
15. Шипулін, В.Д. (2010). *Основні принципи геоінформаційних систем : навчальний посібник*. ХНАМГ.
16. *Молодь: наука та інновації : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*. (2023). Дніпро : НТУ «ДП».
17. *Геофорум-2023 : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. (2023). Львів: Видавництво Львівської політехніки.
18. *Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні : Матеріали XI-ї міжнародної науково-практичної конференції*. (2023). Ужгород: Видавництво.
19. Дорошенко, Я.В. (2009). *Спорудження магістральних трубопроводів : Підручник*. ІФНТУНГ.

ABSTRACT

Purpose. To study the potential of modern geodetic technologies in the design of pipeline crossings over railway tracks, analyze their effectiveness in comparison with traditional methods and provide practical recommendations for the optimal use of GNSS, LiDAR, GIS and UAVs in design work.

The methods. To achieve the goal, an analysis of the use of modern geodetic technologies in construction was carried out, traditional and the latest methods were compared by key parameters, the experience of using GNSS, LiDAR, GIS and UAVs in pipeline design was summarized and practical recommendations were formulated depending on the terrain conditions.

Findings. Modern geodetic surveying methods increase the accuracy of measurements to 1–2 cm (versus 5–10 cm of traditional ones) and reduce the duration of field work from 5–7 to 1–2 days depending on the area. The choice of methodology depends on many factors: the required accuracy, terrain, weather conditions, dense development, natural interference, blocking of GNSS signals and site availability. Trenchless pipeline laying effectively uses digital terrain modeling, which reduces project risks, costs and environmental impact.

The originality. The study established new patterns at the system level for the first time, determining the relationship between the level of implementation of modern geodetic technologies (GNSS, LiDAR, GIS, UAVs) and the efficiency of designing pipeline crossings over railway tracks. It was found that their comprehensive application provides a fivefold increase in measurement accuracy, a reduction in the duration of field work by 20–70%, as well as cost optimization, increased safety and a reduction in the environmental impact. A scientific approach to the digitalization of geodetic processes has been developed, in particular the creation of digital terrain models for infrastructure design. A cause-and-effect relationship between the level of technological integration and the quality of design solutions is substantiated, which forms the basis for updating industry standards.

Practical implementation. The results can be used by design and construction organizations to improve the accuracy of engineering surveys, in planning environmentally friendly infrastructure projects and in the educational process as an example of modern design methods.

Keywords: *modern geodetic methods, GNSS, LiDAR, GIS, UAVs, pipeline, railway, trenchless technologies, digital model, infrastructure, precision design.*