

УДК 528.48

СУЧАСНА ІНЖЕНЕРНА ГЕОДЕЗІЯ. ВИКЛИКИ ТА НОВІ ГОРИЗОНТИ

С. Войтенко, Р. Шульц

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Ключові слова: інженерна геодезія, промислова революція, компетенції, технологія, інженерна споруда, засоби вимірювань.

Постановка проблеми

Поштовхом до написання цієї роботи стала стаття авторів [10], написана п'ять років тому. Сьогодні, аналізуючи стан інженерної геодезії в світі та в Україні зокрема, автори задали логічне питання: якими є загальні проблеми та перспективи інженерної геодезії у світі як окремої технічної науки і чи є інженерна геодезія наукою взагалі? За етапами розвитку інженерної геодезії пов'язаний із досягненнями у технічній і технологічній сферах, а вони зазнають останнім часом істотних змін. Тому актуальним є питання: чи зазнали змін основні положення інженерної геодезії і з якими проблемами може зіткнутися ця наука найближчими роками?

Мета дослідження

Яким є сучасне визначення інженерної геодезії у загальній системі наук? Що являє собою інженерна геодезія з наукового погляду? Чи можлива поява нових напрямів досліджень та нових сфер застосування інженерної геодезії? На ці та інші питання покликана відповісти ця робота.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети доцільно спершу навести короткий історичний екскурс розвитку інженерної геодезії, адже неможливо говорити про майбутнє, не враховуючи особливостей історичного розвитку.

На відміну від класичної геодезії, що, як відомо, займається вивченням форми та розмірів Землі, предметом вивчення інженерної геодезії є штучні об'єкти, як наслідок діяльності людини, та екзогенні процеси, що виникають в результаті такої діяльності. Розглядаючи геодезію в історичному контексті, чи не всі геодезисти як найдавніше застосування геодезії наведуть приклад встановлення меж земельних ділянок та застосування аналогу гідростатичного нівелювання під час будівництва пірамід у Давньому Єгипті. Ці завдання, очевидно, є першим історично відомим фактом застосування методів саме інженерної геодезії. Можемо лише припускати, що для давніх єгиптян питання форми та розміру Землі не мало ані теоретичного, ані практичного сенсу, позаяк історичні відомості про такі завдання відсутні. Загалом відомо, що візитними картками Давнього Риму були розгалужена мережа доріг та акведуки. Зведення таких споруд вимагало від римських

інженерів, якими, до речі, були переважно військові, вирішення таких завдань, як винесення в природу ліній заданого напрямку та ухилу. Римляни стали першими й у розробленні цілого класу геодезичних приладів, за допомогою яких можна було вирішувати прикладні завдання [4]. Такими приладами були: грома – прилад для встановлення об'єктів у створі лінії; хоробат – аналог будівельного рівня; одометр – прилад для вимірювання відстаней; діоптра – прилад для вимірювання вертикальних і горизонтальних кутів; децемпеда – дерев'яна рейка фіксованої довжини з металевими фіксаторами на кінцях, застосовувалась для вимірювання відстаней. Вражає той факт, що принципи, покладені в основу цих приладів, реалізовані у більшості сучасних геодезичних приладів. Із падінням Римської Імперії в геодезії загалом, як і в інших технічних і природничих науках, настав період занепаду.

Становлення класичної геодезії почалось в епоху Відродження, яка пов'язана із епохою Великих географічних відкриттів. Адже саме тоді стало життєвою необхідністю знати геометрію земної кулі та виконувати орієнтування у просторі. Хоч уже у той час в Європі відбувалося будівництво масштабних споруд, прикладами яких були насамперед релігійні (монастирі, собори тощо), справжніх зрушень у сфері прикладного (інженерного) застосування геодезії не відбувалося. Окремі чудові інженерні рішення, звичайно, були. Чого варта хоча б система спостережень за креном собору Санта-Марія-дель-Фьоре у Флоренції (збудованого у 1420–1436 рр.), яку запропонував і реалізував видатний архітектор Філіппо Брунеллескі. Проте такі винятки лише підтверджували загальну тенденцію – інженерної геодезії як окремої науки або хоча б дисципліни у той час не існувало.

На наш погляд, справжнім поштовхом до появи інженерної геодезії стала науково-технічна революція, передусім її складова – промислова революція, що розпочалася на межі XVIII–XIX ст. у Великобританії. Однією з важливих складових промислової революції були зміни у системі транспорту. І не дивно, що першими сучасними інженерами-геодезистами були інженери шляхів сполучення, до завдань яких входив супровід будівництва доріг, залізниць, мостів, захисних споруд тощо. Цікаво простежити аналогію із Давнім Римом, успіхи застосування методів інженерної геодезії у якому також пов'язані із транспортним будівництвом. Отже, з початку XIX ст. інженерна геодезія почала розвиватись як окрема технічна дисципліна. Однак у той період людство цікавили інші питання. Зокрема, залишалися “білі плями” на поверхні Землі, не було завершено повне картографування земної поверхні,

актуальним залишалось питання встановлення реальних розмірів Землі. Не сприяли прикладним застосуванням геодезії і дві світові війни у ХХ ст.

Зіставляючи дати перших теоретичних розробок у інженерній геодезії та спроб трактувати її як окремий науковий напрям, можемо дійти висновку, що, як не дивно, справжній розквіт інженерної геодезії розпочався із космічною ерою. Такий парадоксальний, на перший погляд, висновок має логічне пояснення. Початок космічної ери збігається із періодом порівняно мирного часу на планеті, що більше сприяло саме цивільному технічному прогресу. Водночас починає зменшуватися роль та сфера застосування традиційної геодезії, яку поступово витісняли космічні технології.

Після закінчення Другої світової війни в світі розпочинається масштабне будівництво промислових та цивільних об'єктів і споруд, відкриття та освоєння нових родовищ корисних копалин. Внаслідок цього збільшується навантаження на навколишнє середовище. Якщо до початку Другої світової війни у світі налічувалось лише чотири–п'ять великих промислових регіонів: Рур (Німеччина), Бірмінгем (Великобританія), Донбас (СРСР), Техас (США), то вже на початку 60-х років промислові регіони виникають у всіх капіталістичних країнах та у більшості країн соцтабору. Індустріальна епоха досягла апогею. За твердженнями багатьох вчених, цей та подальші етапи науково-технічного прогресу можна охарактеризувати такими рисами:

- зацікавленість держави у стимулюванні наукових робіт та відповідно збільшення витрат на розроблення та реалізацію наукових інновацій;

- спроби вирішення суперечностей між підвищенням ефективності та обсягів виробництва, з одного боку, та збереженням ресурсів і зменшенням витрат – з іншого боку (на відміну від ранніх періодів науково-технічної революції);

- спрямування основних ресурсів і зусиль на автоматизацію процесів і виробництва.

З часом відбулася міграція промислових регіонів із країн з розвинутою економікою до країн, що розвиваються (переважно Азіатсько-Тихоокеанська зона), однак обсяги виробництва продовжують зростати дотепер, а базові принципи, наведені вище, залишилися незмінними. З іншого боку, ключову роль у становленні інженерної геодезії відіграла концепція великих міст як промислових та фінансових центрів. У таких містах створюється розгалужена транспортна мережа, як на денній поверхні (автомобільні дороги, шляхопроводи, залізниця), так і під землею (тунелі, лінії метро) будують унікальні споруди цивільного призначення (мости, аеропорти, хмарочоси, стадіони, торговельно-розважальні центри тощо.). Згідно із прогнозами багатьох соціологів, демографів та геополітиків, у наступні десятиріччя тенденція до укрупнення міст, збільшення їх розмірів та населення збережеться і, можливо, навіть посилюватиметься. На перший погляд видається, що інженерна геодезія не повинна втрачати ані своєї актуальності, ані можливостей подальшого розвитку.

Проте з чим сьогодні зіткнулись більшість галузей інженерно-технічного спрямування? Відомий американський філософ і соціолог Елвін Тоффлер у своїх працях виділив три послідовні етапи, що характеризують розвиток суспільства:

1. Аграрний (найдовший етап, що тривав зі стародавніх часів до XVIII ст.).

2. Індустріальний (з кінця XVIII ст. дотепер).

3. Інформаційний (теперішній час, коли суспільство входить у постіндустріальну епоху, а основою його існування стає інформація).

З огляду на визначення Е. Тоффлера, стає зрозумілою криза, яка охопила багато технічних галузей, адже вони є породженням індустріальної епохи. Звичайно, інженерна геодезія як суто технічна галузь не може залишатись осторонь цих процесів.

Виникає питання: чи змінились основні завдання інженерної геодезії? У випадку їх змін або навіть зникнення деяких із них інженерна геодезія ризикує опинитися під загрозою зникнення. Відправним пунктом у з'ясуванні цього питання, на нашу думку, має бути визначення інженерної геодезії з погляду її місця у загальній системі технічних знань. Виникають і дотепер є актуальними такі питання: Що таке інженерна геодезія? Прикладна наука, окремий науковий напрям чи просто технічна дисципліна? Які завдання інженерної геодезії і чи є вони сталими, чи змінюються з часом?

Розпочнемо із визначення інженерної геодезії. У роботі [9] наведено таке визначення: “Інженерна геодезія вивчає методи проведення геодезичних робіт при вишукуванні, проектуванні, будівництві та експлуатації інженерних споруд”. Таке визначення є класичним і, швидше за все, його сформулювали радянські школи інженерної геодезії (московська і київська) якраз в 60-ті роки ХХ ст. Упродовж останніх років дискусія з приводу сучасного визначення інженерної геодезії набула значної популярності. Особливо відомим і конструктивним стало обговорення цього визначення у Німецькій геодезичній комісії. В роботі [6] простежено еволюцію змін визначення інженерної геодезії з 1971 р. до 2012 р. У результаті автори запропонували таке визначення: “Інженерна геодезія – це дисципліна, завданням якої є знімання, розмічування та моніторинг геометричних параметрів (характеристик) локальних та регіональних об'єктів з особливими вимогами до точності, засобів вимірювання та систем координат [6]”. Як бачимо, на перший погляд, німецькі вчені зводять інженерну геодезію до простої технічної дисципліни. Одночасно ці ж вчені у [6] перераховують ключові компетенції та унікальні об'єкти, з якими має справу інженерна геодезія, тобто наводять зміст інженерної геодезії, а саме:

- знімання (в широкому сенсі цього слова);

- розмічування (враховуючи високоточне у тривимірному просторі);

- моніторинг (з особливим акцентом на тому, що сучасний моніторинг є міждисциплінарним, в ньому

здіяні геологи, геотехніки, будівельники разом з їх моделями, і ключова компетенція інженера-геодезиста полягає в інтегруванні цих моделей і результатів вимірювань [3]);

– явища, пов'язані з геометрією (особливо процес переходу від дискретного набору точок до моделей)

– масштабування: локальні та регіональні явища (як приклад можуть розглядатися діапазони 0,01–1 м, 1–100 м, 1–10 км, 10–1000 км, де ключовою компетенцією, що вирізняє інженерну геодезію серед інших дисциплін, є оброблення та інтерпретація явищ, що пов'язані з геометрією і містяться одночасно у декількох діапазонах в одній системі координат);

– оцінка та управління якістю (головна умова – виконання вимірювань не з тією точністю, яка можлива, а з тією, яка необхідна) [8];

– засоби вимірювань та геодезична метрологія (за умови, що якщо необхідно, інженерна геодезія створює нові засоби вимірювань);

– системи координат.

На наш погляд, такий обсяг компетенцій та об'єктів є завеликим для простої дисципліни. Очевидно, німецькі вчені вкладають інший зміст у термін “дисципліна”.

У роботі [1], на яку, до речі, посилаються автори [6], дослідник стверджує: “... Більшість прикладних наук не мають властивих їм принципів і використовують набір методологій. Як наслідок, я даю визначення методологіям, які характеризують інженерну геодезію”. Звичайно, в цьому контексті методологію розуміють як науку про методи. Продовжуючи свої міркування, автор дає таке визначення інженерної геодезії: “Інженерна геодезія надає геодезичну інформацію для розроблення технічних проектів, вивчення проектів в природу, контролю будівництва та моніторингу деформацій”. Автор логічно доводить, що інженерна геодезія може використовувати наукові методи та наукові принципи, але не є наукою у загальному сенсі цього слова, а є технологією, тобто застосуванням наукових знань для вирішення практичних завдань. Такого висновку автор доходить у результаті таких міркувань. Наріжний камінь будь-якої науки – це закони і принципи, які, своєю чергою, оперують категоріями “Істина” та “Хиба”. Будь-який принцип вимагає суворого його дотримання. Водночас у технології базовими категоріями є “Добре” і “Погано”. Відмінність очевидна, стверджувати про істинність або хибність якихось явищ в інженерній геодезії безглуздо. Аргументи автора на користь визначення інженерної геодезії як технології є достатньо переконливими.

Коли ж з'явився термін “технологія”? Його вперше використав німецький вчений Йоганн Бекман у 1772 р., тобто знову-таки на початку промислової революції. Сам Й. Бекман вважав технологію наукою. За більш ніж два сторіччя зміст та визначення технології постійно змінювались разом із науково-технічним прогресом. Нові технології є продуктом саме прикладних наукових досліджень, тобто прямиий зв'язок інженерної геодезії з прикладними науками очевидний.

Повертаючись до відсутності в інженерній геодезії таких понять, як закони і принципи, які набувають чітких значень “Істина” або “Хиба”, хочемо послатися на позицію видатного британського математика і філософа Альфреда Норта Уайтхеда [11]. Згідно з міркуваннями А. Н. Уайтхеда, можливо, що навіть закони природи виконуються лише наближено, а отже, можна впевнено говорити про те, наскільки певний закон підходить для опису спостережуваного явища. Тобто навіть до законів і принципів можна застосовувати категорії “Добре” і “Погано”.

Отже, визначаючи інженерну геодезію як технологію, одночасно можна стверджувати, що вона належить до категорії прикладних наук, оскільки сама займається розробленням нових технологій. Відповідно до тверджень А. Н. Уайтхеда, в принципі для прикладної науки немає необхідності у наявності строгих законів або принципів і ми можемо остаточно сформулювати сучасне визначення інженерної геодезії.

Інженерна геодезія є прикладною наукою, що вивчає методи і способи виконання геодезичних робіт під час вишукування, проектування, будівництва, експлуатації інженерних споруд та вивчення технологічних процесів.

Базовим елементом інженерної геодезії як прикладної науки є не створення нових законів або принципів, а вивчення та розроблення нових методів і способів для отримання нових технологій. У цьому контексті класичне визначення [9] інженерної геодезії є достатньо вдалим.

Наведене визначення допоможе нам дати відповідь на питання щодо змін основних завдань інженерної геодезії. Для прикладу перерахуємо основні завдання інженерної геодезії з [9], а саме:

1. Збирання геодезичних матеріалів для розроблення проектів інженерних споруд.
2. Розмічування на місцевості осей і меж споруд відповідно до проекту.
3. Забезпечення геометричних параметрів споруди та її елементів у плані, за висотою та по вертикалі у процесі виконання будівельних робіт.
4. Визначення відхилень споруди та її елементів від проектного положення.
5. Забезпечення монтажу технологічного устаткування.
6. Визначення осідань та деформацій споруд на стадіях зведення та експлуатації.

Наведений перелік завдань є класичним. Вказаний набір завдань визначено у класичних роботах вітчизняних вчених М. Г. Відусва, Г. П. Левчука, М. М. Лебедева, В. Є. Новака, Х. К. Ямбаєва та ін. [10]. Такий підхід абсолютно логічно відповідає життєвому циклу будь-якої інженерної споруди від її проектування до демонтажу. Розглядаючи сучасний підхід до завдань інженерної геодезії, які наведені, наприклад, у роботах [6, 7], зауважимо, що перелік завдань інженерної геодезії залишився незмінним і це зрозуміло, оскільки, як і раніше, ці завдання пов'язані із ключовими фазами будівництва і експлуатації інженерних споруд. То що ж тоді зазнало змін?

Наведене нами визначення інженерної геодезії дає чітку відповідь – змін зазнали методи і способи, які вивчає інженерна геодезія. Зміна цих методів і способів відбулася практично миттєво під впливом таких факторів:

1. Нові засоби вимірювань (ГНСС, електронні тахеометри і фототахеометри, цифрові нівеліри, лазерні сканери, лазерні трекери, радарні інтерферометри тощо).

2. Програмне забезпечення (перехід до складніших і адекватніших моделей, використання строгих та числових методів).

3. Автоматизація вимірювань (перехід від екзотичних громіздких вимірювальних комплексів до компактних вимірювальних систем з можливістю інтегрування будь-яких засобів вимірювання).

Ці фактори є наслідком глобальних процесів не тільки в інженерній галузі, а й у суспільстві загалом, до яких належать: інформатизація; комунікація; автоматизація.

Наведені фактори суттєво вплинули на реалізацію завдань інженерної геодезії, у чому ми надалі впевнимось, аналізуючи безпосередньо завдання інженерної геодезії.

Якщо методи і способи, як окремі елементи загальної технології, є предметом дослідження інженерної геодезії як прикладної науки, то сферою застосування цієї технології є інженерна галузь – від будівництва цивільних споруд до літако- і суднобудування. В цих галузях відбулися зміни не менш революційні, ніж у геодезичній, і спричинені вони тими самими глобальними процесами.

Для інженерної геодезії, мета якої – визначення геометричних та кінематичних характеристик об'єктів або процесів, зміни в інженерній галузі є справжнім випробуванням, оскільки змінилась не тільки сама технологія, а й швидкість виконання робіт і, найголовніше, на порядок і більше ускладнились конструктивні схеми інженерних об'єктів.

Отже, ми з'ясували, в результаті чого та як саме змінились методи і способи інженерної геодезії. Простежимо, як ці зміни відобразились на основних завданнях інженерної геодезії.

1. Збирання геодезичних матеріалів для розроблення проектів інженерних споруд.

У минулому. Традиційно цей пункт пов'язаний із інженерними вишукуваннями на стадії проектування. Мета інженерно-геодезичних вишукувань – створення опорних геодезичних мереж та виконання великомасштабного топографічного знімання. Геодезичні мережі створювались класичними методами триангуляції, трилатерації тощо. Великомасштабне топографічне знімання виконувалось тахеометричним методом або методами горизонтального і вертикального знімання. Геодезичне забезпечення гідрографічних робіт було дуже трудомістким, потребувало створення геодезичних мереж та організації промірних робіт.

Тепер. Точність інженерно-геодезичних вишукувань дає змогу використовувати вимірювальні засоби невисокої точності. Використання ГНСС абсолютно змінило підхід до створення геодезичних мереж. За

наявності мережі постійнодіючих станцій визначення координат станцій знімання взагалі виконують без створення мереж у режимі RTK або PPP. За відсутності ГНСС мережі створюють, використовуючи електронні тахеометри способом лінійно-кутових побудов, причому навіть тахеометри найнижчої точності дозволяють створювати мережі без обмежень на відстані й кути з дотриманням необхідної точності.

Розглядаючи технології топографічного знімання, відзначимо збільшення кількості методів, якими виконують знімання. Серед них: електронна тахеометрія, наземне лазерне сканування, знімання з безпілотних літальних апаратів, ГНСС-знімання, мобільне фотографічне/лазерне знімання тощо. Важливо, що ці та інші методи можна використовувати окремо або в комбінації, створюючи нові технології топографічного знімання.

Окремо необхідно сказати про знімання підземних комунікацій. Істотно зросла точність та особливо надійність визначення положення підземних комунікацій. При цьому технологія знімання підземних комунікацій значно спростилась, а її інформативність підвищилась. Наприклад, сучасний трасошукач, обладнаний ГНСС-апаратурою, дає змогу, за наявності мережі перманентних станцій, без розвинення геодезичної мережі отримувати просторові координати підземних комунікацій одразу в заданій системі координат з одночасним їх внесенням до бази даних підземних комунікацій. Новий тип обладнання – георадар дає змогу визначати не тільки положення комунікацій, а й отримувати характеристики ґрунту на глибині до 4 м.

Під час гідрографічних робіт одержують не набір дискретних точок за заданими створами, а, використовуючи комбіновану систему ГНСС/ехолот, одразу отримують прив'язаний до заданої системи координат підводний рельєф у вигляді ЦМР.

Проблеми. Відзначимо передусім повну відсутність нормативного забезпечення цього розділу інженерної геодезії. Не встановлено характеристики геодезичних мереж для вишукувань під час їх створення з використанням ГНСС та електронних тахеометрів, окремо або в комбінації. Розглянуті методи топографічного знімання не досліджувались з технологічної позиції: швидкість виконання робіт, ефективність методів, доцільність використання залежно від різних топографічних умов та різних типів інженерних споруд. Варто зосередити увагу на комбінуванні різних методів, наприклад наземного лазерного сканування та БПЛА. При цьому завжди треба враховувати, що для вишукувань велике значення має швидкість та здешевлення виконання робіт. Тому, наприклад, доцільним є встановлення умов використання одночастотних та багаточастотних ГНСС-спостережень. Сьогодні результатом інженерних вишукувань є ЦМР та ЦМС. Формування вимог до цих продуктів залежно від типу споруд, для проектування яких вони будуть використовуватись, залишається також невирішеним завданням.

2. *Розмічування на місцевості осей і меж споруд відповідно до проекту.*

У минулому. Для винесення головних осей і меж використовували наявні геодезичні мережі й за необхідності виконували їх згущення. Безпосередньо розмічування виконували методами інженерної геодезії з використанням теодолітів та світловідалемірів.

Тепер. Щільність пунктів геодезичних мереж сьогодні значно вища. За необхідності додаткових пунктів згущення не виконують, а використовують ГНСС-спостереження для визначення координат додаткових пунктів, від яких виконують розмічування, застосовуючи електронні тахеометри.

Проблеми. З технологічного погляду це завдання є найменш трудомістким. Варто звернути увагу на використання ГНСС для розмічування, враховуючи, що розмічування виконують у різних системах координат.

3. *Забезпечення геометричних параметрів споруди та її елементів у плані, за висотою та по вертикалі у процесі виконання будівельних робіт.*

У минулому. Зовнішні геодезичні розмічувальні мережі створювались переважно лінійно-кутовими методами у формі, що наближено повторювала форму споруди. Внутрішні геодезичні розмічувальні мережі створювали найчастіше за допомогою лінійних вимірювань із додаванням кутових вимірів. У 60–80-ті роки ХХ ст. було розроблено набір технологій виконання інженерно-геодезичних робіт, в основу яких було покладено принцип окремого визначення планового положення, висотного положення та відхилення від вертикалі. Для цих завдань використовувався стандартний набір приладів: теодоліти, нівеліри, мірні стрічки, світловідалеміри, прилади вертикального проектування, виски тощо. Геодезист за проектом складав розмічувальні креслення, за якими виконував розмічувальні роботи.

Тепер. Широке впровадження ГНСС та особливо електронних тахеометрів, що працюють у режимі без відбивача, докорінно змінили технологію геодезичного забезпечення будівництва. Завдяки використанню тахеометрів основним методом розмічування став метод вільної станції. За таких умов знизилась вимога до кількості пунктів геодезичної розмічувальної мережі, а її конфігурація може бути довільною. За допомогою одного приладу з високою точністю, достатньою для вирішення більшості геодезичних завдань, розмічування виконують одразу в просторі. Розмічувальне креслення як таке сьогодні не використовується. Цифрова модель проекту завантажується в тахеометр або ноутбук і безпосередньо на будівництві геодезист отримує розмічувальні елементи. Істотно спрощують розмічувальні роботи вбудовані в тахеометр програми розмічування та лазерні вказівники. Сьогодні найефективнішою технологією є застосування роботизованих електронних тахеометрів. Розмічувальні роботи для відстаней до 50 м ефективно з точністю 1–3 мм виконують з використанням багатонапрямних лазерних приладів (до п'яти напрямків). Окремо відзначимо ефективне використання лазерних приладів для розмічування підземних комунікацій.

Окремим напрямом у сучасних розмічувальних роботах є застосування автоматизованих геодезичних комплексів. Під час будівництва лінійних споруд (автомобільних доріг, залізниць, каналів тощо) використовують автоматизовані системи керування будівельною технікою. До складу таких систем входять: ГНСС, лазерні прилади, електронний тахеометр, датчики нахилу. Інформація від різних засобів вимірювання обробляється у комплексі в режимі реального часу, порівнюється з проектом і виводиться на дисплей системи керування. У тунелебудуванні використовують подібні комплекси.

Проблеми. Нормативне забезпечення цього розділу інженерної геодезії також є недостатнім.

Головне завдання сьогодні – розроблення нових алгоритмів та засобів комунікації геодезистів і будівельників для миттєвого аналізу результатів вимірювань у режимі реального часу. Сучасні засоби комунікації дають змогу співпрацювати в режимі реального часу проектувальникам, будівельникам і геодезистам. В результаті такої взаємодії в режимі реального часу істотно підвищиться ефективність будівельно-монтажних робіт, а геодезичні роботи стануть повністю інтегрованими в будівельний процес.

На методи і способи ведення розмічувальних робіт істотно впливають технологія виконання будівельних робіт та види конструктивних схем інженерних споруд. Складність сучасних інженерних споруд вимагає у ході виконання розмічувальних робіт враховувати навантаження, що впливають на споруду під час її зведення. До таких навантажень належать вплив від власної ваги, вплив коливань температури конструкцій і навколишнього середовища, вплив вітрового навантаження, вплив силового навантаження. Такі впливи необхідно враховувати, встановлюючи точність розмічувальних робіт та під час розмічувальних робіт безпосередньо.

У кожному напрямі будівництва виникають специфічні проблеми. Наприклад, у висотному будівництві завдання передавання координат на монтажний горизонт в умовах впливу наведених вище факторів не вирішується традиційними методами вертикального проектування. Аналогічні проблеми виникають під час будівництва наддовгих підземних тунелів, мостів на високих опорах з довгими прогінними конструкціями тощо.

4. *Визначення відхилень споруди та її елементів від проектного положення.*

У минулому. Методично це завдання є оберненим до завдання розмічування. З технологічного погляду ці завдання особливо не відрізняються і для їх вирішення застосовували методи і способи, аналогічні до розмічувальних робіт.

Тепер. Відхилення від проектного положення визначають здебільшого методом вільної станції від пунктів зовнішньої або внутрішньої розмічувальної мережі. Найсучаснішою є технологія, за якою з використанням нових засобів вимірювань та засобів комунікації у режимі реального часу геодезисти співпрацюють з проектувальниками. В світі під час будівництва найсучасніших споруд геодезисти працюють за такою схемою: геодезист вимірює відхилення від проекту і одразу через Інтернет передає ці відхилення

до офісу проєктувальників, де після розрахунків приймають рішення про доцільність усунення відхилення. За необхідності одразу ж через засоби комунікації передається величина необхідного коригування будівельникам і геодезістам. Так створюється замкнений ланцюг, завдяки якому зростає ефективність будівельних процесів.

Ефективним, але недостатньо обґрунтованим є застосування методів ГНСС, наземного лазерного сканування, цифрової наземної фотограмметрії.

Наведені міркування стосуються контрольного знімання інженерних споруд, точність зведення яких або їх окремих елементів характеризується величинами 1–10 мм. Під час контрольного знімання споруд або елементів споруд, точність місцеположення яких є нижчою, широко застосовують знімальні системи. Для автомобільних доріг і залізниць використовують мобільні картографічні системи та безпілотні літальні апарати. Для контрольного знімання ліній електропередач, трубопроводів використовують повітряне лазерне сканування, останнім часом безпілотні літальні апарати обладнують одночасно лідаром і цифровою камерою. Для знімання каналів, штучних водойм, контролю намивних робіт використовують інтегровану систему ГНСС/ехолот.

Нарешті, значно змінилася технологія контрольних зніманий під час виконання маркшейдерського знімання. На перше місце вийшли технології безпілотного аерофотознімання, наземної цифрової фотограмметрії та наземного лазерного сканування.

Проблеми. Наведена технологія інтегрування геодезії у будівельний процес поки що у зародковій фазі й потребує глибшого дослідження. Якщо ми вже звикли, що інженер-геодезист повинен володіти базовими поняттями з технології будівельного виробництва, будівельної механіки, інженерних конструкцій, то у цьому випадку геодезістам, окрім таких знань, необхідні знання із теорії надійності, теорії інформації, засобів зв'язку та комунікацій, систем будівельного проєктування. За таких умов можна здійснити дослідження і розробити рекомендації щодо використання інтегрованої технології контрольного геодезичного знімання.

Попри поширеність ГНСС, цифрової фотограмметрії, наземного лазерного сканування, до їх безпроблемного використання у контрольному зніманні ще дуже далеко. Визначення умов застосування, необхідної точності, технології виконання робіт має стати предметом досліджень у найближчі роки.

Варто не забувати, що від того, з якою точністю необхідно виконати контрольне знімання, залежатиме і технологія, і вибрані засоби вимірювань. Тому питання дослідження мобільних картографічних систем, повітряного лазерного сканування та фотознімання з безпілотних літальних апаратів, засобів батиметричного знімання є вкрай актуальним.

Для контрольного геодезичного знімання складних інженерних споруд залишається актуальним, як і у випадку розмічувальних робіт, врахування впливу різних навантажень на зведену споруду (вітру, снігу, температури, додаткової ваги тощо).

5. *Забезпечення монтажу технологічного устаткування.*

У минулому. Монтаж технологічного устаткування був трудомістким процесом. Практично залежно від виду устаткування геодезисти кожного разу розробляли нові методики і технології, часто нові засоби вимірювань. Більшість розроблених засобів були експериментальними і неуніверсальними.

Тепер. Загалом відомо, що монтаж технологічного устаткування є видом робіт, що потребує найвищої точності. В останнє десятиріччя на допомогу інженерам-геодезістам прийшли прилади з неймовірною виміральною точністю: лазерні трекери, координатні вимірвальні системи, високоточні лазерні системи. У такому напрямі, як контроль точності виготовлення конструкцій, ці засоби вимірювань не мають конкурентів.

Якщо йдеться про точність монтажу конструкцій на рівні 0,5–1 мм, то високоточні електронні тахеометри дають змогу забезпечити таку точність монтажу і застосовуються найчастіше. Традиційні методи продовжують використовуватись, але останнім часом їх витісняють точніші, автоматизовані засоби вимірювання.

Як і у випадку розмічувальних робіт і контрольних зніманий, геодезичне забезпечення монтажу устаткування ведуть у режимі реального часу, безпосередньо порівнюючи виміряне розташування устаткування із його проєктним положенням на цифровій моделі, яка завантажена у контролер тахеометра або роботизованого тахеометра.

Проблеми. За певних умов завдання розроблення нових засобів вимірювань залишається актуальним. Вказані нові засоби вимірювань досліджують тільки з метрологічного погляду. Але основне питання – розроблення методик застосування електронних тахеометрів, лазерних трекерів тощо під час монтажу технологічного устаткування (обертів печі, установки для вироблення паперу, напрямні ліфтових шахт, реакторні відділення АЕС, антени радіотелескопів). До проблематики монтажу технологічного устаткування та використання для цього електронних тахеометрів, лазерних трекерів і систем лазерних датчиків напрямів також можна зарахувати геодезичне забезпечення суднобудування та літакобудування.

6. *Визначення осідань та деформацій споруд на стадіях зведення та експлуатації.*

У минулому. Традиційна схема геодезичних спостережень за осіданнями і деформаціями поділяла методи спостережень залежно від вимірюваних деформаційних характеристик. Вертикальні переміщення визначали методами геометричного, тригонометричного, гідростатичного та гідродинамічного нівелювання. Переміщення у плані встановлювали створними методами та різними варіантами лінійних або куткових побудов та їх комбінацій (триангуляція, трилатерація, полігонометрія, засічки). Спостереження за кренами виконували різними варіантами методу проєктування, методами напрямів, малих кутів та координат. Єдиним методом, що давав змогу визначити одразу просторове переміщення, був стереофотограмметричний.

Тепер. Сучасний геодезичний моніторинг ґрунтується на трьох положеннях: це одночасне визначення просторового переміщення, автоматизація вимірювань та використання складних моделей інтегрування вимірювань та прогнозування.

Для фіксації абсолютних просторових переміщень використовують: ГНСС-спостереження, наземну цифрову фотограмметрію, наземне лазерне сканування, електронну тахеометрію, наземну радарну інтерферометрію. Фіксацію відносних просторових переміщень виконують за допомогою систем багатокординатних датчиків, космічного радарного знімання.

Основною тенденцією під час виконання геодезичного моніторингу складних інженерних споруд є розроблення та застосування автоматизованих систем геодезичного моніторингу. Сьогодні такі системи можуть містити будь-які засоби вимірювань, все залежить тільки від правильності математичних алгоритмів інтегрування даних, які закладено в програмне забезпечення системи. Найвідоміші в світі системи геодезичного моніторингу – Leica GeoMos, Trimble 4D, DC3 Topcon, GOCA.

У програмному забезпеченні систем автоматизованого геодезичного моніторингу використовують складні математичні алгоритми прогнозування. Зокрема, за отриманими переміщеннями методом скінченних елементів розраховують допустимі напруження в конструкціях і порівнюють їх із допустимими. Розроблено та запроваджено нові методи моделювання переміщень: калманівську та вінерівську фільтрацію, нейронні мережі, фур'є-аналіз.

Проблеми. Попри численні дослідження ГНСС-технологій, наземного лазерного сканування, цифрової фотограмметрії, можливості цих засобів у завданнях геодезичного моніторингу повністю не вичерпані. Актуальними, як і для контрольного геодезичного знімання, залишаються питання умов застосування, необхідної точності, технології виконання робіт. Окремо додається питання інтервалів спостережень.

Самі по собі автоматизовані системи геодезичного моніторингу потребують детальних досліджень, їх сертифікація та нормування точнісних і технічних характеристик залишаються відкритим питанням. Вибір складу та точності елементів системи моніторингу – питання практично не досліджене. Якою буде точність та надійність системи у схемах інтегрування, наприклад, ГНСС/електронний тахеометр, ГНСС/датчики, ГНСС/датчики/система гідродинамічного нівелювання або, навпаки, електронний тахеометр/датчики/система гідродинамічного нівелювання?

Головні проблеми очікують на геодезистів під час комплексного оброблення геодезичної та негеодезичної інформації. Об'єднання отриманих переміщень з результатами вимірювання температури конструкцій і ґрунту, вологості, напружень в конструкціях і ґрунті є завданням, вирішення якого все ще на початковій стадії. А з цього випливає ще одна проблема геодезичного моніторингу – розроблення адекватних математичних моделей прогнозування деформаційних процесів.

Навіть перераховані вище математичні моделі потребують детального дослідження. Дотепер не вироблено єдиного підходу до того, як, в яких випадках і які моделі застосовувати [2]: статичні, кінематичні або динамічні. Все залежить від видів навантажень, конструктивної схеми, матеріалів конструкцій, вимірних величин. Навіть за наявності вихідних даних постає питання: якою моделлю описати деформаційний процес: параметричною (система звичайних диференціальних рівнянь, система рівнянь у часткових похідних, метод скінченних елементів) чи непараметричною (нейронні мережі, регресійні моделі) [5]. Тобто тут перед геодезистами постають не тільки завдання, що потребують розв'язання, а й просто цікаві наукові проблеми, вирішення яких може привести до появи нових знань.

Кожне з проаналізованих завдань інженерної геодезії потребує вирішення вказаних проблем. Одночасно сучасний стан інженерно-геодезичних робіт, висвітлений вище, та його проблеми формують нові напрями наукових досліджень в інженерній геодезії, яких, як бачимо, дуже і дуже багато.

Серед проблем, характерних для будь-яких завдань інженерної геодезії, – метрологічне забезпечення засобів вимірювання та нормативне забезпечення вимірювань і технологій. Якщо із метрологічним забезпеченням окремих засобів вимірювань є певний прогрес, то атестація вимірювальних систем навіть не розглядається ані в Україні, ані у світі. Те саме стосується і нормативного забезпечення.

Допоки не будуть вирішені хоча б половина з наведених проблем, інженерній геодезії не загрожує втрата статусу окремої прикладної науки.

Нам залишається дати відповідь на останнє запитання: чи можлива поява нових сфер застосування інженерної геодезії?

Здається, зовсім недавно ми не могли навіть уявити собі, що довжина підземних тунелів досягне 57 км і вони будуватимуться зустрічними забоями без проміжних шахт у горах і під водою, а найдовший міст матиме довжину 164 км з довжиною над водною перепорою 50 км. Нарешті, ніхто не міг подумати про будівлю заввишки майже 1 км, а сьогодні вже розроблено реальні проекти будівель по 2 км. І більше, різні амбіційні проекти з'являються чи не щодня. Ми з'ясували, що інженерна геодезія є складовою науково-технічного прогресу й отримує нові стимули для розвитку із просуванням глобальних процесів. Що ж далі?

За твердженнями багатьох соціологів, економістів, істориків, світ поступово переходить від моделі держави до моделі міста-держави. Всі ми спостерігаємо процес укрупнення великих міст і створення фактично держав у державі. Вже сьогодні населення багатьох міст світу перевищує населення деяких країн (Токіо – 35 млн нас., Сеул – 25 млн нас., Нью-Йорк – 22 млн нас.). Такі міста являють собою окремий інженерний блок, і можна тільки здогадуватись, які завдання доведеться вирішувати будівельній галузі й інженерній геодезії разом з нею, коли в місті із населенням 50–100 млн одночасно необхідно буде забезпечити збірку трьох підземних

тунелів на різних рівнях, а зверху діятиме навантаження від комплексу з 10–12 будівель, висота яких 1,5 км. Новизна полягатиме не тільки у розробленні принципово нових технологій, а й у неминучому інтегруванні знань будівельників, геодезистів, конструкторів, інформатиків, геологів, що створить новий напрям або навіть може привести до повного трансформування інженерної геодезії у нову прикладну науку. Виглядає фантастично, але насправді до появи таких завдань та їх вирішення залишилось набагато менше часу, ніж ми думаємо. Адже фантазія людини та її творчий потенціал не мають меж.

Висновки

Насамперед наведемо відповіді на питання, які намагалися вирішити в цій роботі. Інженерна геодезія є прикладною наукою, що вивчає методи і способи виконання геодезичних робіт під час вишукування, проектування, будівництва, експлуатації інженерних споруд та вивчення технологічних процесів. Предметом дослідження інженерної геодезії є методи і способи виконання геодезичних робіт і розроблення у результаті цього вивчення нових технологій. За останні десятиріччя завдання інженерної геодезії залишились незмінними, проте методи і способи змінилися кардинально. Ці зміни вимагають об'єднання зусиль наукової спільноти та виробничників для вирішення тих проблем, що вже виникли під час виконання всіх завдань інженерної геодезії.

Література

1. Brunner F. K. On the methodology of Engineering Geodesy / F. K. Brunner // *Journal of Applied Geodesy*. – Vol. 1, Issue 2. – P. 57–62, DOI: 10.1515/JAG.2007.008
2. Eichhorn A. Tasks and Newes Trends in Geodetic Deformation Analysis: A Tutorial // A. Eichhorn / 15th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2007). – Poznan, Poland, September 3–7, 2007. – P. 1156–1160.
3. FIG Publication No 25 W. Welsch, O. Heunecke. Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations: Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1.
4. Hucker R. A. How Did the Romans Achieve Straight Roads? / R. A. Hucker // FIG Working Week 2009, Surveyors Key Role in Accelerated Development, Eilat, Israel, 3–8 May 2009.
5. Heunecke O. Terminology and Classification of Deformation Models in Engineering Surveys // O. Heunecke, W. Welsch / *Journal of Geospatial Engineering*. – Vol. 2, No 1. – P. 34–44.
6. Kuhlmann H. Engineering Geodesy - Definition and Core Competencies // H. Kuhlmann, V. Schwieger, A. Wieser, W. Niemeier / *Journal of Applied Geodesy*. – Vol. 8, Issue 4. – P. 327–334, DOI: 10.1515/jag-2014-0020.
7. Niemeier W. Geodetic Techniques for the Navigation, Guidance and Control of Construction Processes // W. Niemeier / 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22–24, 2008. – 16 p.
8. Schweitzer, J. Modeling of quality for engineering geodesy processes in civil engineering // J. Schweitzer,

V. Schwieger / *Journal of Applied Geodesy*. – Vol. 5, Issue 1. – P. 13–22, DOI: 10.1515/jag.2011.002.

9. Войтенко С. П. Інженерна геодезія / С. П. Войтенко. – К.: Знання, 2012. – 574 с.
10. Войтенко С. Перспективи розвитку інженерної геодезії в Україні / С. Войтенко, К. Третяк, Р. Шульц // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2011. – Вип. II(22). – С. 24–27.
11. Мориц Г. Наука, Разум (Дух) и Вселенная. Введение в натурфилософию. / Г. Мориц. – М.: Издательство МИИГАиК, 2010. – 454 с.

Сучасна інженерна геодезія.

Виклики та нові горизонти

С. Войтенко, Р. Шульц

Наведено короткий історичний огляд розвитку інженерної геодезії. Визначено основні етапи її розвитку. На основі аналізу змісту інженерної геодезії та сучасних наукових знань сформульовано сучасне визначення інженерної геодезії як окремої прикладної науки. Виконано аналіз завдань інженерної геодезії, проаналізовано зміни, що відбулися у методах та способах виконання інженерно-геодезичних робіт. Визначено основні проблеми, вирішення яких потребує сучасна інженерна геодезія, та наведено перспективи подальших досліджень.

Современная инженерная геодезия.

Вызовы и новые горизонты

С. Войтенко, Р. Шульц

Приведен краткий исторический обзор развития инженерной геодезии. Определены основные этапы ее развития. На основе анализа содержания инженерной геодезии и современных научных знаний сформулировано современное определение инженерной геодезии как отдельной прикладной науки. Выполнен анализ задач инженерной геодезии, проанализированы изменения, которые произошли в методах и способах выполнения инженерно-геодезических работ. Определены основные проблемы, в решении которых нуждается современная инженерная геодезия, приведены перспективы дальнейших исследований.

Modern engineering geodesy.

Challenges and new horizons

S. Vojtenko, R. Shults

In article, the short historical review of engineering geodesy development is provided. The main stages of engineering geodesy development are defined. On the basis of the analysis of the tasks of engineering geodesy and modern scientific knowledge modern definition of engineering geodesy, as separate applied science is received. The analysis of problems of engineering geodesy is made, changes that happened in methods and ways of performance of engineering geodetic works are analyzed. The main problems, which decision the modern engineering geodesy needs are defined and directions of further researches are given.