

## БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 691

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.1.146

ВІМ-МОДЕЛЮВАННЯ ПІД ЧАС ГЕОДЕЗИЧНОГО КОНТРОЛЮ  
БУДІВНИЦТВА

Наливайко Т. А., Наливайко Т. Т.

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова

*Анотація.* У статті пропонується проаналізувати головні переваги та недоліки використання БПЛА під час геодезичного контролю всіх етапів будівництва. Визначено переваги використання дронів, зокрема більша швидкість виконання робіт, отримання великомасштабних знімків зруйнованих територій, безпека, легкість у використанні, низька вартість. До недоліків належать неможливість проведення точного нівелювання під час аерофотозйомки, значна залежність від погодних умов.

*Ключові слова:* ВІМ, цифрова модель, доповнена реальність, візуалізація графічного об'єкта, 3D-моделювання, моделювання тривимірних об'єктів.

## Вступ

На сьогодні значна кількість інфраструктури Харківщини зруйнована. Досвід минулих років демонструє, що основним недоліком у процесі відбудови українських міст є нестача технологій та своєчасного інформування. Реконструкція інженерних споруд можлива за допомогою ВІМ-технологій, зокрема тривимірних моделей реального стану будівель і споруд, які значно підвищують якість та оперативність етапу відбудови. Сучасні 3D-моделі навколишнього середовища забезпечують досконале дослідження будівель, але не надають реальної та об'єктивної інформації про обсяг руйнування, що є основою для планування робіт з реконструкції.

Критично важливі дані про рівень пошкодження споруд надає комплексний геодезичний моніторинг території. Але застосування наземних геодезичних методів, до яких належать горизонтальна та тахеометрична зйомки, фототеодолітне знімання, нівелювання площин, вимірювання за допомогою GPS-приймачів, нині досить небезпечне.

Використання цифрового знімання та/або лазерного сканування земної поверхні за умови якісного дешифрування, фотограмметричного оброблення під час дослідження ділянки місцевості, здійснених за допомогою сучасних геодезичних приладів, максимально підвищує точність отримання координат точок місцевості. Крім того, вищезазначені дії зменшують вартість створення картографічних матеріалів, тому що отримання даних здійснюється без планово-висотної прив'язки

на місцевості, а це становить більш ніж 78 % польових робіт.

Застосування лазерних сканерів на борту безпілотних літальних апаратів допомагає вирішити важливі завдання у різних галузях, насамперед моніторинг, виконавчі зйомки зруйнованих територій та надання досконалої інформації про рівень пошкодження, екологічний моніторинг, дослідження магістралей, мостів, моделювання територій тощо.

Але всебічне вивчення навколишнього середовища та опрацювання даних передбачає наявність високоефективних сучасних технологій, спеціального програмного забезпечення.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є новітньою високоточною технологією отримання знімків об'єкта безконтактним методом, оскільки зображення є реальним підтверджувальним документом. Нині використання безпілотних апаратів використовується для розвідки та отримання інформації про бойові дії.

## Аналіз публікацій

ВІМ-технології – це інструмент, який дозволяє створити цифрову модель місцевості та водночас проаналізувати інформацію за допомогою залучення різноманітних програмних продуктів, оптимізувати етапи відбудови. Моделі будівель є загальними джерелами інформації для прийняття рішень про об'єкт під час інженерних та інженерно-геодезичних процесів, проектування, будівництва протягом всього терміну експлуатації і під час можливого знесення. Основним

програмним забезпеченням для BIM-моделювання на сьогодні є продукти компанії Autodesk (Revit, Civil 3D, InfraWorks).

GIS використовується для візуалізації та аналізу геопросторових даних, які можуть містити інформацію земельно-кадастрову, екологічну, економічну, демографічну, гідрологічну, археологічну, історичну та іншу інформацію, а інтеграція часових даних дає змогу краще зрозуміти наслідки рішень під час реконструкції об'єкта. Основним програмним забезпеченням для створення GIS-систем є продукти компаній Esri (ArcGis).

Використання можливостей BIM- та GIS-технологій надає переваги під час просторового планування та проектування. Застосування GIS-технологій дозволяє архітекторам, будівельникам, проєктантам, конструкторам використовувати дані інженерних, інженерно-геодезичних робіт та планово-висотних картографічних матеріали в процесі реконструкції.

GIS збільшує цінність BIM завдяки збільшенню різновидності інформативних даних. Інтеграція геопросторових даних в процес проектування є важливим компонентом усього процесу прийняття рішень під час реконструкції міста [2]. Застосування геоприв'язки у BIM-моделюванні дозволяє розглядати роботи з реконструкції як геодезичну інформацію. Це не тільки дає можливість коректно розташовувати об'єкти на топографічних картах, а й дозволяє створювати розумне місто. Розумне місто – це об'єкт, який сприяє збереженню ресурсів і знижує навантаження на споживання енергії. Також GIS може надати проєктантам інформацію про райони, схильні до стихійних руйнувань, що також впливатиме на розташування, орієнтацію і навіть на використання будівельних матеріалів для об'єктів та споруд [3].

Формування BIM- та ГІС-моделей міста має розроблятися одночасно, щоб підвищити ефективність процесу будівництва та реконструкції. Компанії, які розробляють геоінформаційне програмне забезпечення, зокрема Esri й Autodesk, працюють над поліпшеною сумісністю програмного забезпечення для BIM і GIS [4].

На кожному етапі відбудови міста тривимірні фотограмметричні або лазерні моделі з високою роздільною здатністю можна накладати на попередньо заплановані об'єкти BIM для порівняльного аналізу. Це дозволить визначити розбіжності між планами та реальністю [1–4].

### Мета та постановка завдання

Мета геодезичних робіт під час реконструкції зруйнованих будівель міста полягає в геодезичному моніторингу планово-висотного положення місцевості, перевірці вимірних значень, виявленні розбіжностей у 3Д-моделях споруд. Якісний контроль та взаємозв'язок геоданих у 3Д-моделі дає змогу зменшити економічні збитки під час відновлення будівель.

Здійснення запропонованого геодезичного контролю забезпечується даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС), які так само мають велику кількість переваг у процесі роботи зі зруйнованими будівлями.

Дані ДЗЗ є знімками, зробленими на певній висоті. Залежно від типу знімання це можуть бути космічні або аерокосмічні знімки та знімки з безпілотною літальною апарата. Але це дуже вартісні проєкти.

Останнім часом активно використовується технологія лазерного знімання місцевості за допомогою лазерного сканера.

Лазерний сканер – геодезичний прилад, принцип роботи якого полягає у вимірюванні часу руху променя від випромінювача до об'єкта та у зворотньому напрямку. Знаючи швидкість та фіксуючи час поширення сигналу, можна визначити відстань від випромінювача до знятої точки та закріпити її положення на хмарі. У такий спосіб здійснюється безперервна зйомка місцевості у вигляді тривимірної хмари точок, що повною мірою відповідає реальному вигляду об'єкта.

Лазерне сканування має такі переваги:

1 зменшення загального комплексу робіт під час проектування;

2 отримання конкретних результатів зйомки;

3 пошук та позбавлення похибок під час камеральних робіт;

4 зменшення часу на отримання результатів;

5 мінімізація витрат під час геодезичної зйомки та повторних геодезичних робіт;

6 високий рівень деталізації та отримання інформаційної моделі;

7 безпека робіт під час зйомки.

У статті ми зосередимось на дослідженні процесу роботи за допомогою безпілотної апаратури.

Зйомка з БПЛА дозволяє здійснити процес знімання під певними кутами, щоб отримати фактичний стан руйнування стін, вікон, сходових маршів та загалом фасадів буди-

вель, а також створити деталізовані моделі будівель, які досліджувались під час геодезичних робіт.

Вимірювання за допомогою БПЛА здійснюється з повітря на висоті від 100 м і вище. Один процес вимірювання триває протягом 60 хв.

За цей час безпілотний літальний апарат здатний здійснити аерофотозйомку території, що дорівнює 1,5–10 км<sup>2</sup>. За швидкості руху 12 м/сек оператор контролює процес зйомки на відстані 3 км.

Ситуативна аерофотозйомка необхідна для отримання загальної фотографії площі, де здійснюються дослідження, коли це неможливо зробити із землі.

Під час топографічного аерознімання за допомогою БПЛА необхідно вирішити низку вадвань, забезпечивши такі процеси:

- стабілізацію БПЛА під час проведення його за маршрутом;
- збереження заданої швидкості польоту;
- визначення висоти фотографування;
- зведення до мінімуму кутів нахилу.

Тому головною проблемою є дослідження причин виникнення похибок внаслідок дії вищезазначених чинників та визначення способів їх усунення. Завданням експериментальних досліджень було визначення висоти зависання БПЛА щодо земної поверхні та порівняння її значення із запланованими показниками бортового навігатора.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення експерименту було використано квадрокоптер Phantom-3 (рис. 1), електронний тахеометр TRIMBLE 3305DR, оптичний теодоліт ЗТ5КПІ, нівелір з компенсатором 2Н10КЛ.

Phantom-3 обладнаний 12-мегапіксельною камерою (об'єктив – F/2.8, кут огляду – 94 градуси) з можливістю зйомки FHD 1920 × 1080р, HD: 1280 × 7 та відеозапису UHD 4096 × 2160р. Безпека камери та гасіння коливань забезпечується трьохосовим карданним підвісом. Він надає можливість обертати на камеру на 120 градусів та утримує її горизонтально за різних умов польоту. Процес розпочинаємо з наведення зорової труби теодоліта та тахеометра на коптер.

Під час процедури наведення сітки ниток зорових труб електронного тахеометра і теодоліта на квадрокоптер на його чотири опори були наклеєні марки та виміряна відстань  $l = 0,13$  м від низу його опор до марки. На території місцевості було облаштовано базис  $b$  (рис. 2).

Пункт 1 та пункт 2 – це крайні точки фіксації базису. На місцевості вони закріплені металевими кілками, забитими в асфальтне покриття. Пункт 3 – місце старту БПЛА, закріплене кілком.



Рис. 1. Квадрокоптер DJI Phantom 3

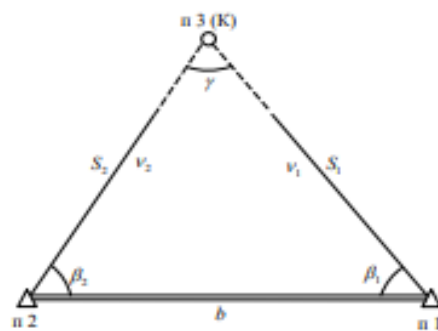


Рис. 2. Планове та висотне положення БПЛА

На підготовчому етапі експерименту в системі координат МСК-74 співвідносно базової станції в GNSS-мережі в режимі реального часу було визначено координати кінців базису та пункту 3. Наступним етапом є польові роботи.

Під час проведення польових робіт оптичний теодоліт встановлювали на пункт 1. Електронний тахеометр встановлювали на пункт 2. Визначено місце нуля МО вертикального кола теодоліта:  $МО = 1,5'$ .

Дрон встановлювали над пунктом 3 та задавали різну висоту польоту:  $h = 10$  м; 15 м; 20 м та 25 м.

Після набору заданої висоти та зупинки квадрокоптера здійснювалось синхронне наведення візирної осі зорових труб тахеометра й теодоліта на закріплені марки квадрокоптера та вибирали відліки за ГК та ВК горизонтального та вертикального кіл.

На станції встановлення теодоліта та тахеометра інструменти були в робочому положенні, здійснена необхідна орієнтація, визначені висоти інструментів та вимірні позначки точок станції методом технічного нівелювання.

Результати відхилення БПЛА наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Відхилення БПЛА в плані по вертикалі та за висотою

Висота h, м	10	15	20	25
Відхилення від вертикалі f, м	0,73	0,76	1,25	0,63
Відхилення за висотою f, м	+1,22	+1,31	+0,65	+1,38

### Результати дослідження

Під час дослідження визначено, що БПЛА після виходу на задану висоту був нестійким у просторі, хоча сила вітру була незначною – 5 м/с. З цієї причини синхронність наведення візирної осі зорових труб тахеометра та теодоліта на марки квадрокоптера порушувалась. Різниця висот, отриманих під час спостережень з обох кінців бази-су, складає 32 см для розрахункової висоти квадрокоптера 20 м. Мінімальна різниця дорівнює 5 мм для висоти 10 м і 13 мм для висоти 25 м, що демонструє достовірність цих результатів.

Під час експерименту визначено, що відхилення за висотою квадрокоптера складає + 1,22 м та + 1,38 м від запланованої, але ці значення не відповідають точності, зазначеної виробником БПЛА, яка дорівнює  $\pm 0,1$  м. Максимальне відхилення квадрокоптера у плані від точки старту складає 1,25 м для запланованої висоти квадрокоптера 20 м, а всі інші значення не перевищують  $\pm 1$  м, що відповідає точності утримання квадрокоптера в плані по вертикалі, яка зазначена виробником.

Дані БПЛА використовують для складання земельно-кадастрової інформації, моніторингу інженерних споруд, проектно-пошукових робіт, планування ремонтних заходів.

### Висновки

Актуальність розробленого підходу для сучасної України до моніторингу зруйнованих територій міста дозволить після війни в скорочені терміни здійснити інвентаризацію будівель і створити план відновлення об'єктів інфраструктури, ремонтних і реставраційних робіт.

Методика використання безпілотних літальних апаратів та спеціальних програм, на відміну від наземних геодезичних методів, дають змогу безконтактно та економічно вигідно здійснити топографічну зйомку зруйнованих територій з метою отримання цифрових 3D-моделей BIM.

### Література

1. Посудін Ю. І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища. Київ, 2003. 288 с.

2. Лисицький, Д. В., Хорошилов В. С., Бугаков П. Ю. Картографічне відображення тривимірних моделей місцевості. Геодезія та аерофотозйомка. 2016. № 2 доп. С. 216–218.
3. Створення геодезичної основи для будівництва об'єктів енергетики / Уставич Г. А., Китаєв Г. Г., Никонов А. В., Сальников В. Г. Геодезія та аерофотозйомка. 2018. № 4. С. 48–54.
4. World Development Indicators | DataBank. DataBank. The World Bank. URL: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/Series/ST.INT.XPND.MP.ZS> (дата звернення: 10.12.2022).
5. The World Bank. Gross domestic product 2021. 2022. 4 р. URL: <https://databankfiles.worldbank.org/data/download/GDP.pdf> (дата звернення: 10.12.2022).
6. Contributors to Wikimedia projects. Rendering (computer graphics). Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering\\_\(computer\\_graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_(computer_graphics)) (дата звернення: 13.12.2022).
7. Склад та зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування: Держ. буд. норми України від 23.10.2013 р. № ДБН А.2.2-Х-20XX. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/11/DBN-nachalo-02.11.2016.pdf> (дата звернення: 11.12.2022).
8. Воронкіна О. Використання геоінформаційних технологій для реставрації будівель історичного значення: колективна монографія за матеріалами V Всеукраїнської науково-технічної конференції, 1–2 груд. 2022 р. Житомир, 2022. С. 25.

### References

1. Posudin Yu. I. (2003) Methods of vimiryuvannya parametriv navkolyshny medium. Kyiv. 288 c.
2. Lissitzky, D. V., Khoroshilov V. S., Bugakov P. Yu. (2016) Cartographic rendering of trivi-world models of space. Geodesy and aerial photography. № 2. Pp. 216–218.
3. Creation of geodetic bases for everyday life of energy facilities (2018) Ustavich G. A., Kitaev G. G., Nikonov A. V., Salnikov V. G. Geodesy and aerial photography. № 4. Pp. 48–54.
4. World Development Indicators | DataBank. DataBank | The World Bank. URL: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/Series/ST.INT.XPND.MP.ZS> (date of application: 10.12.2022).
5. The World Bank. Gross domestic product 2021. 2022. 4 p.

URL:

<https://databankfiles.worldbank.org/data/download/GDP.pdf> (date of application: 10.12.2022).

6. Contributors to Wikimedia projects. Rendering (computer graphics). Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering\\_\(computer\\_graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_(computer_graphics)) (date of application: 13.12.2022).
7. Composition and content of scientific project documentation for the restoration of monuments of architecture and urban planning: state. Building Norms of Ukraine dated 10/23/2013. No. DBN A.2.2-X-20XX. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2016/11/DBN-nachalo-02.11.2016.pdf> (access date: 11.12.2022).
8. Voronkina O. The use of geoinformation technologies for the restoration of buildings of historical importance: collective monograph based on the materials of the 5th All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Zhytomyr, December 1–2. 2022. Zhytomyr, 2022. P. 25.

**Наливайко Тарас Антонович**, к.т.н., доц. каф. земельного адміністрування та геоінформаційних систем, тел. +380993022178,

[Taras.Nalyvaiko@kname.edu.ua](mailto:Taras.Nalyvaiko@kname.edu.ua),

**Наливайко Тетяна Тарасівна**, к.т.н., асистент каф. цифрового моделювання та графіки, тел. +380667271801,

[nalivaykot@gmail.com](mailto:nalivaykot@gmail.com),

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, м. Харків, Україна.

### **BIM-modeling for geodetic control of construction**

**Abstract. Problem.** *At each stage of the city's reconstruction, high-resolution three-dimensional photogrammetric or laser models can be superimposed and compared to pre-planned BIM objects. The issue is researching the causes of aerial photography errors and identifying the ways to eliminate them.*

**Goal.** *The task of experimental research is to determine the hovering height of an unmanned aerial vehicle relative to the earth's surface and to compare the value of the height with the planned parameters of the on-board navigator. Methodology.* *A Phantom-3 quadrocopter, a TRIMBLE 3305DR electronic*

*total station, and a 3T5KP optical theodolite were used for the experiment. Nivelir 2N10KL marks were pasted on the four sides of the quadrocopter and the distance from the bottom of its legs to the mark was measured to guide the grid of sighting tubes of the electronic total station and theodolite. Results.* *As a result of the experiment, it was found that the deviation in the height of the quadrocopter is + 1.22 m and + 1.38 m from the planned one, but these values do not correspond to the accuracy specified by the unmanned aerial vehicles manufacturer, which is  $\pm 0.1$  m. Originality.* *New BIM method creates new possibilities for geodesists on construction sites. Geodesists in their practice on construction sites when performing geodetic works have to quickly adapt to new operational procedures, requirements on spatial determination of objects, new technical equipment, SW instruments and standards exploited in BIM method. The value of geodetic works is also the transformation of the resulting spatial data into territorial information systems in 3D-representation. Practical value.* *The maximum deviation of the quadrocopter in the plan from the starting point was 1.25 m for the planned height of the quadrocopter of 20 m, and all other values do not exceed  $\pm 1$  m, which corresponds to the accuracy of keeping the quadrocopter in the vertical plan. It is expedient to use situational aerial photography with the help of a quadrocopter in the study of destroyed buildings in modern urban development. It is especially necessary to obtain a general photograph of the area on which research is being carried out, when this cannot be done from the ground.*

**Key words:** *BIM, digital model, augmented reality, visualization of a graphic object, 3D modeling, modeling of three-dimensional objects, building, surveying methods, information system about territory*

**Nalivayko Taras**, Ph. D., Assoc. Prof. Land administration and geoinformation systems department, tel. +380993022178, [Taras.Nalyvaiko@kname.edu.ua](mailto:Taras.Nalyvaiko@kname.edu.ua),

**Nalyvaiko Tatiana**, Ph.D., assistant Digital Modeling and Graphics department,

тел. +380667271801, [nalivaykot@gmail.com](mailto:nalivaykot@gmail.com),

<sup>1</sup> О. М. Бекетов Kharkiv National University of Urban Economy, 17 Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.