
РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ КРЕНУ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД БАШТОВОГО ТИПУ

Є.Г. ХЛИПОВКА,

старший викладач кафедри геодезії

E-mail: hevengeng@knu.edu.ua

ORCID: 0009-0009-0855-8475

Криворізький національний університет

В.В. ПЕРЕГУДОВ,

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геодезії

E-mail: vperegudov@knu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-6173-1374

Криворізький національний університет

А.Ю. ПАЛАМАР,

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії

E-mail: palamar1alena@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2682-6786

Криворізький національний університет

О.М. НОВІКОВА,

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії

E-mail: elenanovikova131254@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8096-5168

Криворізький національний університет

К.Р. НАЗАРЕНКО,

асистент кафедри геодезії

E-mail: katarina.nazarenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0022-8799

Криворізький національний університет

Анотація. У статті досліджено сучасні підходи до визначення крену інженерних споруд баштового типу із застосуванням безпілотних літальних апаратів та методів цифрової фотограмметрії. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення точності, оперативності та безпеки геодезичного контролю технічного стану висотних споруд, які в процесі експлуатації зазнають впливу природних і техногенних факторів. Запропоновано методикку визначення крену димових труб, що базується на виконанні аерофотознімання квадрокоптером із подальшою фотограмметричною обробкою отриманих цифрових зображень у програмному комплексі Digital. Детально розглянуто основні етапи

польових робіт, планування маршрутів польоту, отримання фотоматеріалів, побудову просторової моделі об'єкта, визначення координат характерних точок конструкції та розрахунок величини крену. За результатами експериментальних досліджень підтверджено високу ефективність запропонованої методики, яка забезпечує отримання достовірних геометричних параметрів споруди та дозволяє виконувати оцінку її просторового положення з необхідною точністю. Встановлено, що використання безпілотних літальних апаратів істотно скорочує тривалість польових вимірювань, зменшує трудомісткість геодезичних робіт, мінімізує ризики для персоналу під час обстеження важкодоступних об'єктів та знижує економічні витрати порівняно з традиційними методами інструментального контролю. Практична цінність дослідження полягає у розробленні універсальної методики геодезичного визначення крену баштових споруд, придатної для виконання експлуатаційного контролю, технічного обстеження, моніторингу деформацій та своєчасного виявлення небезпечних змін просторового положення висотних інженерних конструкцій.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА), квадрокоптер, аерофотознімання, фотограмметрія, крен споруди, димова труба, геодезичний моніторинг.

Актуальність

Різноманітність висотних споруд баштового типу призвело до розробки численних методів їх зведення, що залежать від конструктивних особливостей споруди і його параметрів, застосовуваних матеріалів, характеристик будівельного майданчика. Великий тиск на підставу, вітрові та теплові впливи призводять до деформацій, які вимагають обліку при зведенні баштового споруди.

При впливі температурного градієнта, силових факторів, підвищеної вологості в агресивному середовищі в несучих конструкціях можливо утворення системи вертикальних і горизонтальних тріщин в відшаруванні цегли. Істотний вплив можуть надати помилки при проектуванні, а також некоректні припущення при розрахунку оболонки стовбура димової труби.

Сучасні технології створення топографічних та кадастрових планів

ґрунтуються саме на використанні матеріалів цифрового аерознімання. Однак собівартість застосування літаків та гелікоптерів для локального великомасштабного знімання на порядок вища. Тому альтернативним рішенням є використання для вищевказаних цілей БПЛА, які дають змогу швидко та економічно вигідно виконати аерознімання територій невеликої площі, з метою складання кадастрових планів та ортофотопланів,

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема визначення крену інженерних споруд баштового типу досліджується переважно в напрямках використання електронної тахеометрії, наземного лазерного сканування, фотограмметрії та комплексних автоматизованих систем моніторингу. Сучасні дослідження орієнтовані на перехід від спостережень за окремими контрольними точками до побудови

просторових моделей споруди та визначення положення її геометричної осі на різних висотних рівнях.

У роботі Ž. Pleterski, G. Rak та K. Kregar [1] запропоновано визначати неперпендикулярність димових труб за даними наземного лазерного сканування. Автори поділяють хмару точок на вузькі горизонтальні перерізи, вилучають сторонні точки алгоритмом RANSAC, апроксимують контури колами або еліпсами методом найменших квадратів і за зміщенням центрів перерізів визначають просторове положення осі труби. Перевагою методу є можливість аналізу локальних відхилень конструкції на різних висотах.

M. Zhou та співавтори [2] розробили автоматизований підхід до визначення крену промислових димових труб за LiDAR-хмарами точок. Метод передбачає формування горизонтальних зрізів, визначення геометричних центрів, апроксимацію центральної осі та розрахунок кута і напрямку нахилу. Дослідники також застосували інтеграцію LiDAR, GNSS-позиціонування та дистанційної передачі даних, що підвищує рівень автоматизації моніторингу.

У дослідженні Ji, Ren, Fu, Zhang та Li [3] запропоновано визначати динамічні переміщення одностійкових комунікаційних веж шляхом об'єднання даних акселерометрів і тензOMETричних датчиків із використанням фільтра Калмана. Такий підхід забезпечує безперервне оцінювання деформаційного стану споруди, проте потребує встановлення спеціалізованих датчиків безпосередньо на конструкції.

Перспективність використання безпілотних літальних апаратів для технічного обстеження споруд підтверджено в дослідженні J. Ває та

співавторів [4]. Запропонована система поєднує аерофотознімання, термографію, алгоритми машинного навчання та побудову тривимірних хмар точок для виявлення тріщин і деформацій конструкцій. Дослідження доводить доцільність застосування БПЛА для безконтактного огляду важкодоступних частин інженерних об'єктів.

Проведений аналіз показує, що лазерне сканування забезпечує детальне відтворення геометрії баштових споруд, а автоматизовані сенсорні системи — безперервність спостережень. Водночас лазерні сканери й стаціонарні вимірювальні комплекси характеризуються високою вартістю та складністю розгортання. Тому актуальним залишається розроблення доступнішого безконтактного методу визначення крену димових труб із використанням квадрокоптера, цифрових знімків і програмного комплексу Digitals. Запропонований підхід має передбачати визначення центрів верхнього, нижнього та проміжних перерізів споруди, побудову її геометричної осі й обчислення лінійного та кутового крену.

Метою дослідження є розроблення та експериментальна апробація методу визначення крену інженерних споруд баштового типу із застосуванням безпілотних літальних апаратів і цифрової фотограмметрії для підвищення точності, оперативності та безпеки геодезичного контролю їх технічного стану.

Матеріали і методи дослідження

Нові технічні рішення конструкцій, нове обладнання, вироби та матеріали повинні мати підтвердження їх

придатності для застосування в умовах будівництва та експлуатації висотних будинків згідно з постановою КМ України ДБН В.1.3-2:2010 [5].

Геодезичні роботи в зв'язку із технічною складністю висотного об'єкта рекомендується виконувати спеціалізованими організаціями, які мають ліцензію на виконання цього виду робіт та повинні виконуватись згідно зі ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [6]. Для зведення висотних будинків рекомендується створення постійно діючої геодезичної групи на весь період будівництва цього об'єкта.

Для унікальних будівель і споруд, а також при виконанні спостережень, що вимагають безперервного отримання результатів вимірювань, рекомендується використовувати автоматизовані системи спостережень. Моніторинг деформацій будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації, слід проводити в разі появи неприпустимих тріщин, розкриття швів, а також різкої зміни умов роботи будівлі або споруди.

Крен є найбільш характерним показником спільної деформації висотної споруди. У таких спорудах, що володіють підвищеною чутливістю до деформацій ґрунтів основи, крен викликає розвиток додаткового моменту, який в свою чергу сприяє збільшення крену і може привести до втрати стійкості споруди [1,7-8].

Отже, об'єкти баштового типу (димові труби, ректифікаційні колони, грануляційні башти, радіотелевізійні антенні опори тощо) належать до інженерних споруд підвищеного рівня відповідальності.

Під час виконання будівельних робіт або в процесі експлуатації споруди можуть зазнавати деформацій унаслідок нерівномірного осідан-

ня та дії інших чинників. Крім того, через конструктивні особливості споруд можуть виникати кручення та згин, спричинені нерівномірним сонячним нагріванням або вітровим навантаженням. Це може призводити до крену споруд, тобто їх відхилення від вертикалі [3].

Подібні деформації можуть привести до втрати стійкості споруди. Тому періодичне визначення деформацій (моніторинг) набуває особливої актуальності [9]. За результатами таких вимірювань при необхідності можуть розроблятися профілактичні заходи для усунення крену з метою забезпечення безаварійної експлуатації споруди.

Сучасні тенденції оцінки деформаційного стану споруд полягають в створенні автоматизованого, постійно діючого моніторингу з використанням високоточних систем космічного позиціонування (GPS-систем), роботизованих електронних тахеометрів, високоточних інклінометрів (типу Leica Nivel210 / Nivel220) з точністю вимірювання кута нахилу 0,09 сек., і застосуванням програмного комплексу GeoMoS (LeicaGeosystems) [10-14].

Значна частина висотних інженерних споруд, що експлуатуються в Україні, була введена в дію кілька десятиліть тому та функціонує в умовах тривалого впливу природних і техногенних факторів. У процесі експлуатації такі споруди зазнають дії нерівномірних осідань фундаментів, температурних коливань, вітрових навантажень, вібрацій та інших чинників, що можуть спричиняти зміну їх геометричного положення, виникнення крену та розвиток деформацій. З огляду на це особливого значення набуває впровадження сучасних методів геодезичного контролю, які

забезпечують своєчасне виявлення відхилень від проєктного положення та об'єктивне оцінювання технічного стану споруд.

Більшість традиційних методів визначення крену баштових споруд базується на виконанні високоточних кутових і лінійних вимірювань із використанням електронних тахеометрів, теодолітів або інших геодезичних приладів. Незважаючи на високу точність отриманих результатів, такі методи потребують створення геодезичної опорної мережі, забезпечення взаємної видимості між пунктами спостережень та значних витрат часу на виконання польових вимірювань. Крім того, проведення геодезичних робіт на промислових об'єктах часто ускладнюється обмеженням доступом до споруди та необхідністю дотримання підвищених вимог безпеки.

Відповідно до чинних нормативних документів [6], контроль просторового положення висотних інженерних споруд повинен здійснюватися протягом усього періоду їх експлуатації. Для новозбудованих об'єктів геодезичні спостереження за креном і осіданнями фундаментів рекомендується виконувати не рідше двох разів на рік протягом перших двох років експлуатації. Надалі періодичність спостережень визначається технічним станом споруди та інтенсивністю деформаційних процесів. За умови стабілізації осідань контрольні вимірювання можуть проводитися з більшими інтервалами відповідно до вимог нормативної документації.

Останніми роками значного поширення набули безпілотні літальні апарати (БПЛА), які є ефективним інструментом для виконання інженерно-геодезичних робіт і технічного обстеження висотних споруд. Виконання

робіт квітання квадрокоптерів, оснащених високороздільними цифровими камерами та супутниковими навігаційними системами, забезпечує можливість оперативного отримання фотограмметричних матеріалів із важкодоступних ділянок об'єкта без необхідності виконання небезпечних висотних робіт. Сучасні БПЛА дозволяють здійснювати фото- та відеознімання у форматі 4K, автоматично реєструвати координати центрів фотографування, а також формувати масиви даних, придатні для побудови ортофотопланів, цифрових моделей місцевості та тривимірних моделей інженерних споруд [1, 3, 8, 15-16].

В даній роботі для аерофотознімання інженерної споруди баштового типу використовувався безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 Pro, оснащений цифровою камерою з 1-дюймовою CMOS-матрицею роздільною здатністю 20 Мп, об'єктивом із фактичною фокусною відстанню 8,8 мм (еквівалентною 24 мм у 35-мм форматі) та механічним затвором, що забезпечує мінімізацію геометричних спотворень під час знімання. Просторова прив'язка фотограмметричної моделі виконувалася без застосування високоточного RTK-позиціонування. Визначення просторового положення моделі здійснювалося на основі даних, отриманих під час аерофотознімання, та подальшої фотограмметричної обробки цифрових зображень. Калібрування камери виконувалося автоматично в процесі фотограмметричної обробки із застосуванням методу самокалібрування внутрішніх параметрів. Такий підхід забезпечив формування просторової моделі інженерної споруди, достатньої для визначення її геометричних параметрів та оцінювання величини

крену в межах поставлених завдань дослідження. РТК-позиціонування в межах проведеного експериментального дослідження не застосовувалося, тому його вплив на точність просторової прив'язки фотограмметричної моделі не оцінювався.

Вертикальне знімання оголовка труби виконувалося з перевищенням приблизно 7 м над верхньою точкою споруди. За таких умов площа охоплення одного кадру становила орієнтовно $10,5 \times 7,0$ м, а розрахунковий розмір пікселя на поверхні об'єкта (GSD) — близько 1,9 мм/пікс. Обрана висота забезпечувала повне розміщення оголовка труби в центральній частині кадру та достатній запас навколо його контуру для визначення геометричного центра верхнього перерізу.

Оскільки розроблений метод визначення крену базується на незалежному аналізі зображень, перекриття кадрів не передбачалося. Теоретично мінімальна кількість зображень, необхідна для одноразового визначення крену, становить чотири: по два зображення, отримані з протилежних напрямків уздовж кожної з взаємно перпендикулярних осей X та Y (рис. 2). Для підвищення достовірності та точності визначення крену вимірювання доцільно виконувати декілька разів із подальшим усередненням отриманих результатів.

Результати дослідження та їх обговорення

Для дослідження крену димової труби теплоелектроцентралі, як споруди баштового типу, використовувався безпілотний літальний апарат DJI Phantom 4 Pro. Процес виконання аерофотознімання за допомогою

БПЛА включає підготовку майданчика запуску, планування маршруту польоту з урахуванням наявних перешкод і метеорологічних умов, а також визначення основного та резервного місць посадки.

Перед початком знімання на земній поверхні біля труби будуються базиси в двох взаємно перпендикулярних напрямках, які формують умовну систему координат X, Y . Саме вздовж цих напрямків послідовно здійснюється фото- та відеознімання труби, що забезпечує повне охоплення геометрії споруди.

На фотознімку рис. 1 представлена труба теплотраси Центрально-Міського району міста Кривий Ріг, Обстеження труби виконувалося в 2021 році. Базиси на рис. 2 показані червоними переривчастими лініями. Їх реальна довжина, виміряна на поверхні землі, дорівнює:

$$S_X = 16,482 \text{ м}, S_Y = 20,261 \text{ м} \quad (1)$$

Вздовж кожного базису за одне фотознімання труби формуються не менш як 2 знімки. На рис. 2 показані два положення труби під час зйомки та схематично показані нижнє коло труби (чорний колір) та верхнє коло труби (червоний колір). Зйомка виконується таким чином, щоб центр знімка збігся з верхнім краєм труби послідовно спочатку в положенні, яке показано на рис. 2 а, а потім в положенні, яке показане на рис. 2 б.

На отриманих знімках виконується вимірювання відстаней між верхнім та нижнім колами труби. Перша різниця вздовж руху квадрокоптера позначається літерою a , друга — b . Загальний крен вздовж кожної осі обчислюється по формулам:

$$\Delta x_i = a_i^x - b_i^x, \quad (2)$$

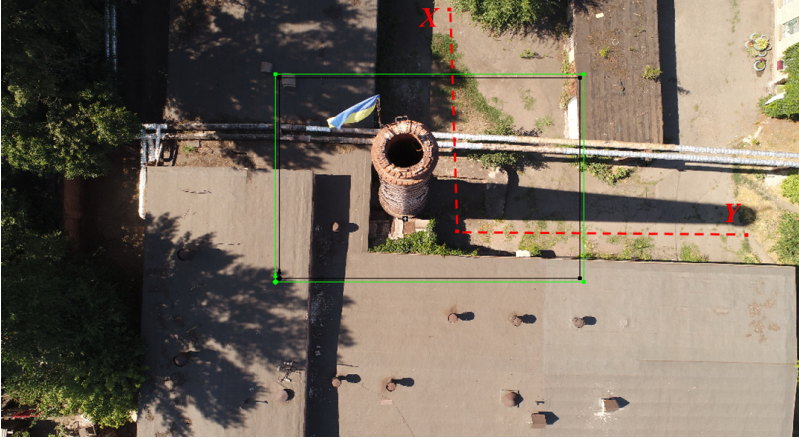


Рис. 1 – Умовна система координат, сформована за допомогою взаємоперпендикулярних базисів (зйомка крена труби теплотраси 2021 року)

$$\Delta y_i = a_i^y - b_i^y, \quad (3)$$

де a_i^x, b_i^x – різниці між нижньою та верхньою колами труби вздовж осі X ; a_i^y, b_i^y – аналогічні величини вздовж осі Y i – того циклу вимірювань крену.

Для визначення кута крену мінімально необхідні дві пари знімків, отримані під час зйомки вздовж двох взаємно перпендикулярних осей. Такий набір даних забезпечує можливість обчислення крену, проте точність результату обмежується похибками окремих вимірювань.

Для підвищення точності та достовірності визначення крену доцільно виконувати серію незалежних вимірювань, наприклад дві групи по чотири знімки (по дві пари знімків у кожній групі). Подальше усереднення отриманих результатів дає змогу зменшити вплив випадкових похибок, шумів вимірювальної системи та нестабільності умов зйомки, що забезпечує більш точне й відтворюване визначення кута крену.

Перед початком фотограмметричної обробки виконується масштабування знімків за контрольними ба-

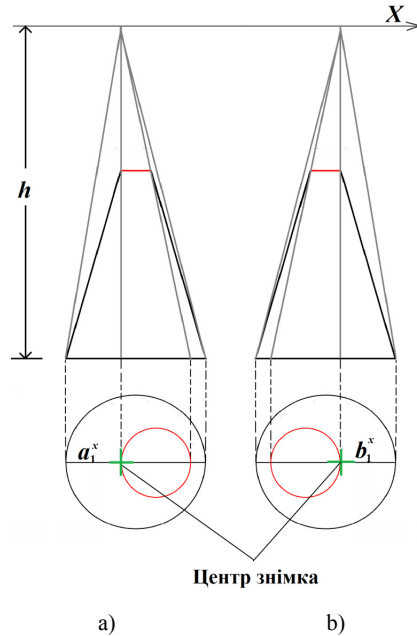


Рис. 2 – Схема положень труби у вертикальній площині під час фотознімання та відповідні зображення її нижнього і верхнього поперечних перерізів: а) центр знімка суміщено з верхнім краєм труби в першому положенні; б) центр знімка суміщено з верхнім краєм труби в другому положенні.

зисами, закріпленими на місцевості (рис. 1). Для цього виконується вимірювання довжин базисів на знімках. Для базисів, представлених рівняннями (1), були отримані наступні значення:

$$s_X = 0,329 \text{ м}, s_Y = 0,405 \text{ м} \quad (4)$$

Масштаб знімку розраховується вздовж кожної осі по формулам:

$$m_X = \frac{s_X}{s_{X'}}, m_Y = \frac{s_Y}{s_{Y'}} \quad (5)$$

Загальний масштаб знімку обчислюється як середнє арифметичне з масштабів вздовж осей X, Y. Для розглянутої задачі він виявився рівним:

$$m = \frac{1}{50,06}$$

За допомогою цього масштабу крен, отриманий в одиницях знімків переводиться в абсолютні одиниці.

Для визначення геометричних параметрів верхньої частини димової труби виконують векторизацію її контуру у програмному комплексі Digitals. На першому етапі в меню «Збір» обирають інструмент створення лінійного об'єкта, після чого послідовно виконують оцифрування зо-

внішнього контуру верхнього обрізу труби шляхом фіксації характерних точок по її периметру. Для підвищення точності апроксимації криволінійної поверхні застосовується функція «Вставити дугу», яка забезпечує згладжування окремих лінійних сегментів та формування геометрично коректного контуру.

На завершальному етапі здійснюється редагування положення опорних точок з урахуванням форми контуру, що дозволяє мінімізувати похибки оцифрування та отримати точну модель верхнього перерізу димової труби. Сформований контур використовується для подальшого визначення координат центра перерізу, побудови геометричної осі споруди та розрахунку величини її крену (рис. 3).

Аналогічним чином виконується визначення геометричних параметрів нижнього перерізу димової труби. Оскільки частина контуру перекрита конструктивними елементами споруди, оцифровуються лише видимі точки периметра. За отриманими точками програмний комплекс Digitals автоматично визначає центр кола та



Рис. 3 – Результат формування геометрично скоригованого контуру верхнього перерізу димової труби після редагування опорних точок



Рис. 4 – Загальний центр та діаметр вже сбудованою частиною відсутніх елементів нижнього кола труби

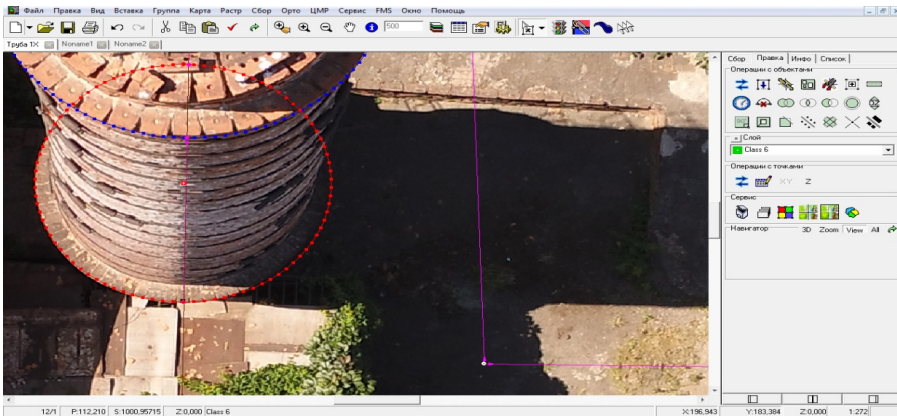


Рис. 5 – Визначення периметра контуру нижнього перерізу димової труби у програмному комплексі DigitalS

його діаметр, що дає змогу відновити відсутню частину нижнього кільця й сформувати повний контур перерізу для подальшого визначення геометричної осі та розрахунку крену споруди (рис. 4-5).

На рис. 5 представлена процедура визначення периметру контуру нижнього перерізу димової труби у програмному комплексі DigitalS. Для труби, яка розглядається периметр визначений рівним: $P = 11,221$ м.

Діаметр труби розраховується на

основі периметру за допомогою відомої формули:

$$D = \frac{P}{\pi} \quad (6)$$

і дорівнює: $D = 3,57$ м.

Для подальших обчислень необхідно сформувати осьову лінію через центри верхнього та нижнього кіл, так як це показано на рис. 6. Процедура виконується в програмному комплексі DigitalS.

Верхній і нижній перерізи відповідають горизонтальним перерізам

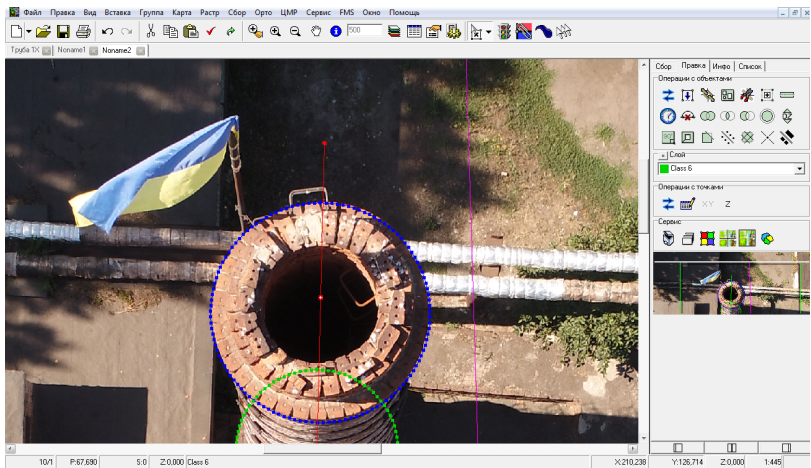


Рис. 6 – Осьова лінія, яка проводиться між верхнім та нижнім колами димової труби

труби на рівні її оголовка та основи відповідно, а відстань між їх геометричними центрами по вертикалі прийнята рівною повній висоті досліджуваної споруди — 35 м; зміщення центра верхнього перерізу відносно центра нижнього характеризує величину крену труби.

За допомогою цієї осьової лінії

вимірюється величини a_r , b_r . Зокрема, для знімків, отриманих вздовж осі X,Y визначені величини, представлені в табл. 1.

У табл. 1 величини a_i^x , b_i^x , a_i^y , b_i^y наведено як результати вимірювань, отримані на цифровому зображенні за допомогою програмного комплексу Digitals. Значення подано в міліме-

1. Обчислення крену труби теплоцентралі Центрально-Міського району (Кривий Ріг) за двома циклами спостережень

Величина	Чисельне значення	Величина	Чисельне значення
a_1^x (мм, на знімку)	4,93	a_2^x (мм, на знімку)	7,43
b_1^x (мм, на знімку)	3,68	b_2^x (мм, на знімку)	6,18
a_1^y (мм, на знімку)	5,05	a_2^y (мм, на знімку)	7,52
b_1^y (мм, на знімку)	3,84	b_2^y (мм, на знімку)	6,33
a_1^x (мм)	246,7	a_2^x (мм)	371,8
b_1^x (мм)	184,4	b_2^x (мм)	309,6
a_1^y (мм)	252,6	a_2^y (мм)	376,5
b_1^y (мм)	192,3	b_2^y (мм)	317,1
Δx_1 (мм)	62,3	Δx_2 (мм)	62,2
Δy_1 (мм)	60,3	Δy_2 (мм)	59,4
ΔL_1 (мм)	86,7	ΔL_2 (мм)	86,0
ΔL_{cp} (мм)	86,4	Відносна похибка (%)	1

трах у системі координат знімка. Для переведення цих величин у реальні лінійні розміри їх необхідно поділити на масштабний коефіцієнт:

$$Z = \frac{z}{m}, \quad (7)$$

де z — будь-яка з величин a_i^x , b_i^x , a_i^y , b_i^y виміряна в одиницях знімка; m — масштаб зображення; Z — відповідна величина, виражена в реальних одиницях.

Використання результатів двох незалежних груп знімків дає змогу підвищити достовірність визначення просторового положення геометричної осі споруди та мінімізувати вплив похибок фотограмметричної обробки. На основі отриманих значень виконується розрахунок абсолютної величини крену димової труби вздовж осей X та Y за допомогою формул (2-3).

Для додаткової перевірки достовірності отриманих результатів виконано контрольне зіставлення з результатами тахеометричного визначення крену. Контрольне значення крену прийнято рівним 85,6 мм. Середнє значення, отримане за результатами двох циклів БПЛА-знімання, становило 86,35 мм. Абсолютна різниця між результатами дорівнює 0,75 мм, а відносна розбіжність — 0,87 %, що свідчить про високу узгодженість результатів та підтверджує можливість застосування запропонованого

методу для визначення крену інженерних споруд баштового типу.

Для оцінювання точності визначення крену сформовано бюджет невизначеності, який враховує основні складові фотограмметричного процесу: масштабування цифрового зображення, векторизацію контуру, визначення геометричного центра перерізу, просторову роздільну здатність зображень (GSD) та повторюваність результатів двох незалежних циклів спостережень. Комбіновану стандартну невизначеність визначено шляхом урахування окремих складових невизначеності, а розширену невизначеність для довірчої ймовірності приблизно 95 % — із застосуванням коефіцієнта охоплення $k=2$.

За результатами оцінювання невизначеності величину крену досліджуваної димової труби можна представити у вигляді $K=(86,35 \pm 3,08)$ мм за довірчої ймовірності приблизно 95 %. Відповідний довірчий інтервал становить 83,27–89,43 мм. Отриманий інтервал характеризує діапазон можливих значень крену з урахуванням основних джерел невизначеності фотограмметричного визначення та підтверджує відтворюваність результатів двох циклів спостережень.

Абсолютний крен труби обчислюється так:

$$\Delta L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (8)$$

2. Контрольне зіставлення з результатами тахеометричного визначення крену

Метод / цикл	Крен, мм	Різниця від контрольного значення, мм	Розбіжність, %
БПЛА, цикл 1	86,7	1,1	1,29
БПЛА, цикл 2	86,0	0,4	0,47
Середнє значення БПЛА	86,35	0,75	0,87
Контрольне тахеометричне значення	85,6	0	0

3. Бюджет невизначеності

Джерело невизначеності	Стандартна невизначеність, мм
Масштабування зображення	0,80
Векторизація контуру	0,70
Визначення центра перерізу	0,90
Вплив GSD та дискретності зображення	0,55
Повторюваність двох циклів	0,35
Комбінована стандартна невизначеність (u_c)	1,54
Розширена невизначеність ($U_{\{95\}}, (k=2)$)	3,08

Оскільки досліджувана споруда являє собою димову трубу, застосування положень міжнародного нормативного документа CICIND (Model Code for Steel Chimneys) [17, р. 22] є обґрунтованим та відповідає його сфері застосування. Використовуючи висоту труби, визначену за результатами аерофотознімання з квадрокоптера, відповідно до положень розділу 11.7 CICIND (Model Code for Steel Chimneys) можна розрахувати граничне відхилення труби від вертикалі за наведеною нижче формулою [17, р. 22]:

$$\Delta_{\text{доп}} = \max(0,025, \frac{H}{0,6}). \quad (9)$$

де H — висота труби, м. В цьому випадку величина $\Delta_{\text{доп}}$ також визначається в м. Для досліджуваної труби висота становить 35 м. Отже, гранично допустиме значення крену дорівнює:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0,058 \text{ м.}$$

За результатами виконаних розрахунків встановлено, що величина крену досліджуваної димової труби становить 0,086 м (табл. 1), що перевищує розрахункове граничне значення 0,058 м. Виявлене перевищення свідчить про необхідність проведення термінового комплексного технічного обстеження спо-

руди із залученням спеціалізованої організації для уточнення її фактичного технічного стану та прийняття обґрунтованого рішення щодо умов подальшої експлуатації.

Запропонована методика не обмежується визначенням загального крену споруди. Для підвищення інформативності дослідження доцільно виконувати визначення положення центрів проміжних горизонтальних перерізів димової труби на різних висотних рівнях. Побудова кіл, що відповідають геометрії цегляної кладки кожного перерізу, дозволяє визначити локальні значення відхилень осі споруди відносно її основи та дослідити характер просторової деформації по всій висоті конструкції.

Наявність координат центрів перерізів на декількох висотних рівнях створює можливість побудови тривимірної цифрової моделі димової труби із застосуванням програмних комплексів Digital, AutoCAD або іншого спеціалізованого програмного забезпечення. Така модель забезпечує візуалізацію просторового положення геометричної осі споруди, визначення напрямку крену відносно сторін горизонту та аналіз впливу зовнішніх факторів, зокрема вітрових навантажень, температурних деформацій і нерівномірного осідання фундаменту.

Додатковою перевагою використання безпілотної літальної апаратури є можливість проведення детальної візуальної обстеження зовнішньої поверхні споруди. Аерофотознімки високої роздільної здатності дозволяють виявляти тріщини, локальні руйнування, дефекти цегляної кладки, пошкодження захисного покриття та інші ознаки погіршення технічного стану конструкції. Поєднання фотографічних вимірювань із резуль-

татами візуального обстеження забезпечує комплексну оцінку технічного стану димової труби, створює інформаційну основу для прогнозування розвитку деформаційних процесів та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшої експлуатації, ремонту або реконструкції споруди.

Таким чином, запропонована методика поєднує можливості аерофотограмметрії, цифрового моделювання та геодезичного аналізу, що дозволяє оперативно, безконтактно й з достатньою точністю визначати крен інженерних споруд баштового типу та здійснювати комплексний моніторинг їх технічного стану.

Висновки і перспективи

У результаті проведеного дослідження розроблено та апробовано метод визначення крену інженерних споруд баштового типу із застосуванням безпілотних літальних апаратів та цифрової фотограмметричної обробки матеріалів аерознімання. Запропонований підхід базується на визначенні геометричних параметрів верхнього та нижнього перерізів споруди за цифровими зображеннями, отриманими з протилежних напрямків знімання, із подальшим розрахунком просторового положення геометричної осі та величини крену.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість використання квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro у поєднанні з програмним комплексом Digitals для виконання геодезичного контролю висотних споруд. Отримані результати показали, що визначене значення крену димової труби (0,086 м) перевищує розрахункове граничне значення (0,058 м). Встановлене перевищення обґрунтовує необхідність

термінового проведення комплексного технічного обстеження споруди із застосуванням інструментальних методів контролю для оцінювання її фактичного технічного стану та визначення можливих умов подальшої експлуатації.

Запропонована методика забезпечує комплексне оцінювання технічного стану інженерної споруди, оскільки, крім визначення величини крену, дозволяє виконувати побудову просторової тривимірної моделі об'єкта, визначати положення його геометричної осі на різних висотних рівнях, аналізувати характер деформацій та здійснювати детальне візуальне обстеження зовнішньої поверхні конструкції. Використання високоякісних аерофотознімків створює можливість своєчасного виявлення тріщин, пошкоджень кладки, локальних дефектів та інших ознак погіршення технічного стану споруди.

Порівняно з традиційними геодезичними методами запропонований підхід характеризується скороченням тривалості польових робіт, відсутністю необхідності створення спеціальної геодезичної мережі, підвищенням безпеки виконання вимірювань на важкодоступних промислових об'єктах та зменшенням витрат на проведення інженерно-геодезичних робіт.

Отримані результати підтверджують можливість застосування безпілотного аерофотознімання та цифрової фотограмметрії для визначення геометричних параметрів і оцінювання крену інженерних споруд баштового типу. Просторова прив'язка фотограмметричної моделі в межах проведеного дослідження здійснювалася без використання RTK-позиціонування, а внутрішні параметри камери визначалися методом автома-

тичної самокалібровки під час фотограмметричної обробки. Одержаної якості просторової моделі було достатньо для вирішення поставленого завдання та визначення величини крену досліджуваної споруди.

Перспективним напрямом подальших досліджень є автоматизація процесу визначення крену на основі алгоритмів комп'ютерного зору, інтеграція результатів аерофотознімання з даними наземного лазерного сканування та GNSS-вимірювань, а також створення автоматизованої системи моніторингу технічного стану інженерних споруд баштового типу в режимі реального часу. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню ефективності геодезичного контролю, своєчасному виявленню небезпечних деформацій та забезпеченню безпечної експлуатації висотних інженерних споруд.

Список використаної літератури

1. Pleterski Ž., Rak G., Gregar K. Determination of Chimney Non-Verticality from TLS Data Using RANSAC Method. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 23. Art. 4541. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234541>.
2. Zhou M., Qin Y., Xie Q., Song Q., Lin S., Qin L., Zhou Z., Wu G., Yan P. Tilt Monitoring of Super High-Rise Industrial Heritage Chimneys Based on LiDAR Point Clouds. *Buildings*. 2025. Vol. 15. Art. 3046. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15173046>.
3. Ji X., Ren L., Fu X., Zhang Q., Li H. Deformation Monitoring of Monopole Communication Towers Based on Multi-Source Data Fusion. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 11. Art. 2709. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112709>.
4. Bae J., Lee J., Jang A., Ju Y. K., Park M. J. SMART SKY EYE System for Preliminary Structural Safety Assessment of Buildings Using Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 7. Art. 2762. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072762>.
5. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві. Київ : Мінрегіон України, 2010. 70 с.
6. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження і моніторингу будівель і споруд. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 47 с.
7. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 36 с.
8. Popović J., Pandžić J., Pejić M., Vranić P., Milovanović B., Martinenko A. Quantifying Tall Structure Tilting Trend through TLS-Based 3D Parametric Modelling. *Measurement*. 2022. Vol. 188. Art. 110533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110533>.
9. Teng J., Shi Y., Wang H., Wu J. Review on the Research and Applications of TLS in Ground Surface and Constructions Deformation Monitoring. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 23. Art. 9179. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22239179>.
10. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. GPS Satellite Surveying. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 840 p.
11. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More. Wien : Springer, 2008. 516 p.
12. Welsch W. M., Heunecke O. Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. FIG Publication No. 25. Copenhagen : International Federation of Surveyors (FIG), 2001. URL: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub25/figpub25.asp> (дата звернення: 06.07.2026).
13. International GNSS Service (IGS). GNSS Data Formats and Standards. URL: <https://igs.org/formats-and-standards/> (дата звернення: 13.07.2026).
14. Leica Geosystems AG. Leica GeoMoS Monitoring Solution. URL: <https://leica-geo->

- systems.com/products/total-stations/software/leica-geomos (дата звернення: 03.07.2026).
15. García-Nieto M. C., Huesca-Tortosa J. A., Martínez-Segura M. A., Espín de Gea A., Navarro M. Structural Deformation Monitoring Using UAV Photogrammetry to Assess Slender Historic Buildings. *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 100. Art. 111766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111766>.
16. Sun J., Peng B., Wang C. C., Chen K., Zhong B., Wu J. Building Displacement Measurement and Analysis Based on UAV Images. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 140. Art. 104367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104367>.
17. CICIND. Model Code for Steel Chimneys: The CICIND Chimney Standard. Revision 2. Rotterdam : International Committee on Industrial Chimneys, 2010. 23 p. URL: <https://pdfcoffee.com/cicind-model-code-for-steel-chimneys-1999-pdf-pdf-free.html> (дата звернення: 13.07.2026).
-
- References**
1. Pleterski, Ž., Rak, G., & Kregar, K. (2024). Determination of chimney non-verticality from TLS data using RANSAC method. *Remote Sensing*, 16(23), Article 4541. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234541>
2. Zhou, M., Qin, Y., Xie, Q., Song, Q., Lin, S., Qin, L., Zhou, Z., Wu, G., & Yan, P. (2025). Tilt monitoring of super high-rise industrial heritage chimneys based on LiDAR point clouds. *Buildings*, 15, Article 3046. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15173046>
3. Ji, X., Ren, L., Fu, X., Zhang, Q., & Li, H. (2023). Deformation monitoring of monopole communication towers based on multi-source data fusion. *Buildings*, 13(11), Article 2709. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13112709>
4. Bae, J., Lee, J., Jang, A., Ju, Y. K., & Park, M. J. (2022). SMART SKY EYE system for preliminary structural safety assessment of buildings using unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 22(7), Article 2762. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072762>
5. DBN V.1.3-2:2010. Heodezychni roboty u budivnytstvi [Geodetic works in construction]. (2010). Minrehion Ukrainy.
6. DSTU-N B V.1.2-18:2016. Nastanova shchodo obstezhennia i monitorynhu budivel i sporud [Guidelines for inspection and monitoring of buildings and structures]. (2016). DP "UkrNDNTs".
7. DBN V.2.1-10:2018. Osnovy i fundamente budivel ta sporud. Osnovni polozhennia [Foundations of buildings and structures. Basic provisions]. (2018). Minrehion Ukrainy.
8. Popović, J., Pandžić, J., Pejić, M., Vranić, P., Milovanović, B., & Martinenko, A. (2022). Quantifying tall structure tilting trend through TLS-based 3D parametric modeling. *Measurement*, 188, Article 110533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110533>
9. Teng, J., Shi, Y., Wang, H., & Wu, J. (2022). Review on the research and applications of TLS in ground surface and constructions deformation monitoring. *Sensors*, 22(23), Article 9179. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22239179>
10. Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). GPS satellite surveying (4th ed.). John Wiley & Sons.
11. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer.
12. Welsch, W. M., & Heunecke, O. (2001). Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations (FIG Publication No. 25). International Federation of Surveyors (FIG). Available at: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub25/figpub25.asp>
13. International GNSS Service. (n.d.). GNSS data formats and standards. Available at:

- <https://igs.org/formats-and-standards/>
14. Leica Geosystems AG. (n.d.). Leica Geo-MoS monitoring solution. Available at: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/software/leica-geomos>
 15. García-Nieto, M. C., Huesca-Tortosa, J. A., Martínez-Segura, M. A., Espín de Gea, A., & Navarro, M. (2025). Structural deformation monitoring using UAV photogrammetry to assess slender historic buildings. *Journal of Building Engineering*, 100, Article 111766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.111766>
 16. Sun, J., Peng, B., Wang, C. C., Chen, K., Zhong, B., & Wu, J. (2022). Building displacement measurement and analysis based on UAV images. *Automation in Construction*, 140, Article 104367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104367>
 17. International Committee on Industrial Chimneys (CICIND). (2010). Model code for steel chimneys: The CICIND chimney standard (Rev. 2). Available at: <https://pdffcoffee.com/cicind-model-code-for-steel-chimneys-1999-pdf-pdf-free.html>

Hlypovka Ye., Perehudov V., Palamar A., Novikova E., Nazarenko K.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE TILT OF TOWER-TYPE ENGINEERING STRUCTURES

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 3'26: 229-244.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.03.16>

Abstract. paper investigates modern approaches to determining the tilt of tower-type engineering structures using unmanned aerial vehicles (UAVs) and digital photogrammetry techniques. The relevance of the research is driven by the growing need to improve the accuracy, efficiency, and safety of geodetic monitoring of high-rise engineering structures subjected to natural and anthropogenic influences throughout their operational life. A geodetic methodology for determining the tilt of industrial chimneys is proposed, based on UAV aerial image acquisition followed by photogrammetric processing of digital images using the Digitals software package. The study describes the principal stages of the proposed methodology, including flight mission planning, image acquisition, photogrammetric data processing, three-dimensional reconstruction of the structure, determination of the coordinates of characteristic points, and calculation of the tilt magnitude. Experimental investigations confirmed the effectiveness and reliability of the proposed approach, demonstrating its capability to provide accurate geometric characteristics of the structure and to assess its spatial position with a high degree of precision. The obtained results indicate that UAV-based photogrammetric surveying significantly reduces fieldwork duration, decreases labor intensity, enhances personnel safety during inspections of inaccessible structures, and lowers operational costs compared with conventional geodetic surveying methods. The practical significance of the research lies in the development of a universal geodetic methodology for tilt determination of tower-type engineering structures that can be effectively applied for operational inspection, technical condition assessment, deformation monitoring, and the timely detection of hazardous changes in the spatial position of high-rise engineering facilities. The proposed methodology provides an efficient, reliable, and economically feasible solution for modern engineering surveying and structural health monitoring applications.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); quadcopter; aerial photogrammetric survey; digital photogrammetry; structural tilt; industrial chimney; geodetic monitoring.