

ДИСТАНЦІЙНА ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНЬ КИЇВСЬКОЇ ТЕЛЕВЕЖІ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОФОТОЗЙОМКИ ТА МЕТОДУ ФОТОГРАММЕТРІЇ

Л.М. Лобанов¹, Д.І. Стельмах¹, В.В. Савицький¹, В.П. Дядін¹, О.П. Шуткевич¹, А.Г. Козачек²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: d.stelmax1996@gmail.com

²Концерн радіомовлення, радіозв'язку та телебачення. 04112, м. Київ, вул. Дорогожицька, 10. E-mail: a.kozachek@rrt.ua

Стаття присвячена застосуванню методів неруйнівного контролю та візуального обстеження з використанням БПЛА (дронів) для оцінки пошкоджень конструкції телевежі. Описано методологію, яка включає застосування аерофотозйомки та методу фотограмметрії для створення тривимірної моделі телевежі та локалізації пошкоджень. За допомогою програмного забезпечення 3DF Zephyr побудовано 3D-модель, що дозволило встановити розміри дефектів та провести їх класифікацію. На основі проведеного обстеження розроблено рекомендації щодо оперативного ремонту та відновлення телевежі з метою забезпечення безпеки її експлуатації. Представлені результати підтверджують високий потенціал поєднання традиційних методів неруйнівного контролю з дистанційною діагностикою на основі застосування дронів та фотограмметрії для обстеження великогабаритних конструкцій. Бібліогр. 10, рис. 4.

Ключові слова: БПЛА (дрон), фотограмметрія, неруйнівний контроль, 3D-модель, візуалізація, телевежа

Вступ. Запобігання аварійним ситуаціям та забезпечення надійної роботи великогабаритних споруд передбачає проведення регулярних профілактичних заходів для збереження їх технічного стану. Метою інспектування великогабаритних конструкцій є виявлення можливих недоліків, дефектів або потенційно проблемних зон, які потребують технічного обслуговування. У випадку великогабаритних конструкцій для ефективного виявлення дефектів необхідно використовувати спеціалізоване додаткове обладнання, що ускладнює процес, робить його тривалим, трудомістким і небезпечним для виконавців [1]. Крім того, для успішного проведення інспектування потрібно залучати професійних альпіністів та отримувати дозволи на їх роботу на об'єкті. У багатьох випадках також існують місця з обмеженим оглядом та важким доступом, що знижує ефективність виявлення пошкоджень.

Одним із можливих способів подолання вищезазначених обмежень є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Однак присутність кваліфікованих інженерів на місці продовжує відігравати фундаментальну роль у виконанні завдання інспекції (наприклад, пілот, другий пілот, експерт у сфері діагностики матеріалів). Крім того, для отримання об'єктивних результатів важливо усунути залежність їх перевірки від досвіду, фізичних аспектів і набору навичок оператора БПЛА. Результати не можуть бути досягнуті в режимі реального часу і деякі дефектні місця потрібно підтверджувати та обстежувати неоднора-

зово. Тому потрібні досвідчені професійні фахівці у сфері неруйнівного контролю якості.

У статті описується процедура обстеження Київської телевежі, яку було пошкоджено ворожим ракетним ударом 1-го березня 2022 р. внаслідок військової агресії росії. Київська телевежа – суцільнометалева зварна просторова ґратована висотна споруда заввишки 380 м, побудована в 1968–1973 рр. – була найвищою решітчастою вільно розташованою конструкцією в світі на момент спорудження [2, 3]. Враховуючи, що Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» були авторами проекту цієї унікальної інженерної споруди, обстеження та оцінка технічного стану металоконструкцій вежі виконувалась цими організаціями.

Візуальне та інструментальне обстеження металоконструкцій вежі в зоні завдання ракетного удару з позначки +0,000 до позначки + 80,000 виконувалось у чотири етапи з використанням наступних методів неруйнівного контролю:

- візуально-вимірювальний;
- магнітна дефектоскопія;
- ультразвуковий контроль основного металу та зварних з'єднань елементів вежі;
- візуальне обстеження за допомогою БПЛА.

Методи обстеження великогабаритних металевих конструкцій. Візуально-вимірювальний контроль полягав у зовнішньому огляді трубчастих елементів вежі, вузлових зварних з'єднань, фасонки та інших елементів її металевих кон-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Савицький В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-2615-1793>,

Дядін В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-2061-8436>, Шуткевич О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-5758-2396>,

Стельмах Д. І. – <https://orcid.org/0000-0002-0412-9747>

© Л.М. Лобанов, Д.І. Стельмах, В.В. Савицький, В.П. Дядін, О.П. Шуткевич, А.Г. Козачек, 2023

струкцій. Огляд металевих елементів вежі проводився з відміток 0; +5; +40; +72 та +80 м.

Основною задачею візуально-вимірювального методу контролю було виявлення та фіксація всіх візуально спостережених пошкоджень елементів металоконструкцій вежі для подальшої їх оцінки. Так, у залежності від енергії впливу уламків на стінку труб можна виділити декілька видів ушкодження елементів конструкції:

- повне проникнення уламка крізь одну стінку труби без впливу на другу стінку;
- повне проникнення уламка крізь одну стінку труби з пластичним деформуванням другої стінки;
- повне проникнення уламка крізь дві стінки труби (простріл);
- часткове проникнення уламка в одну стінку труби на різну глибину (кратер);
- наявність вм'ятини в стінці труби без проникнення уламка;
- деформація елемента під впливом уламків та ударної хвилі;

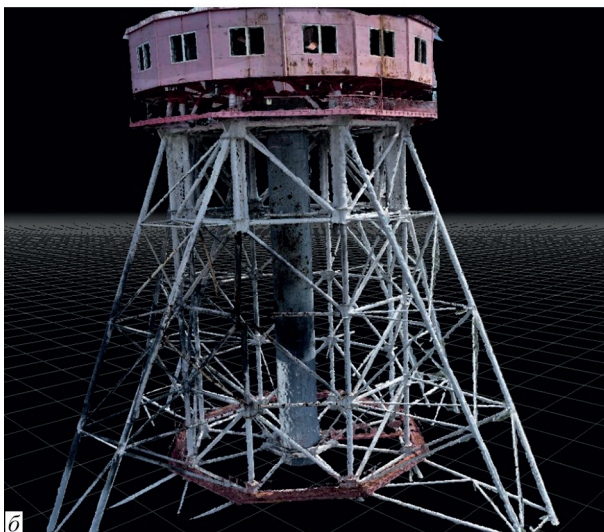
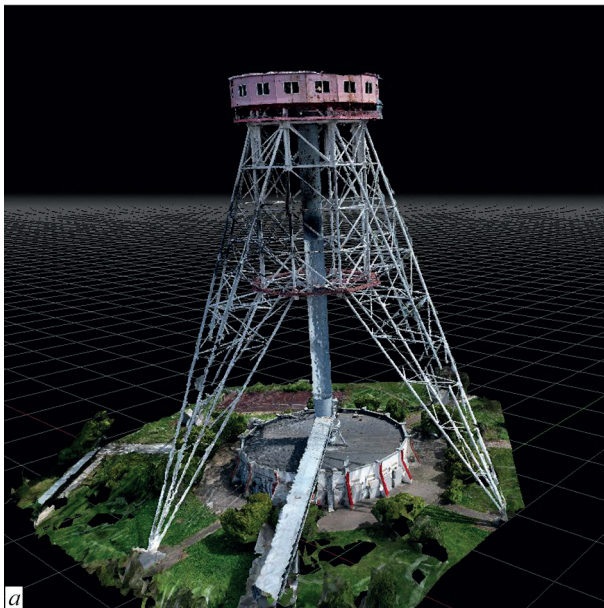


Рис. 1. Моделі нижнього ярусу Київської телевежі: *а* – повномасштабна модель; *б* – місце вибуху

- руйнування елемента чи вузла його кріплення;
- наявність тріщин в місцях впливу уламків та у вузлах розкріплення елементів;
- руйнування гасників коливань між елементами.

Особливості застосування магнітного та ультразвукового методу контролю полягали у вірогідному виявленні волосяних наскрізних, поверхневих та підповерхневих тріщин у місцях ударного впливу та проникнення уламків ракети крізь стінку елементів металоконструкцій вежі. У місцях виявлених ушкоджень робилося фотографування з реєстрацією місця їх розташування.

Внаслідок виконаної інспекції різних ділянок металоконструкцій телевежі було встановлено:

1. У місцях, схильних до значного силового впливу, не виявлено протяжних прихованих тріщин, тобто тріщин, що виходять на внутрішню поверхню або тріщини всередині металу, які не можуть бути виявлені візуально. Практично всі виявлені та досліджені тріщини є наскрізним розривом металу. Є нечисленні деформовані ділянки, де на внутрішній поверхні виявляються сліди розтріскування. Оцінка розмірів такого розтріскування становить лише кілька мм.

2. При інструментальному обстеженні металу в місцях з очевидною пластикою та розривами кількісні оцінки розмірів розтріскування практично дорівнюють візуально-вимірювальним оцінкам, відмінність становить не більше 2...3 мм.

3. У місцях, віддалених від зон пластичної деформації та слідів ударної дії, не виявлено дефектів (зокрема тріщин).

Протягом останнього десятиліття почалось широке використання безпілотних літальних апаратів (дронів) для виконання великого спектру завдань, у тому числі для проведення неруйнівного контролю якості.

При дослідженні пошкоджень телевежі застосування цього методу діагностики було обумовлено декількома причинами. По-перше, доступні місця візуального огляду пошкоджених елементів конструкцій не дозволяли оглянути всю поверхню просторових конструкцій у зв'язку з обмеженням

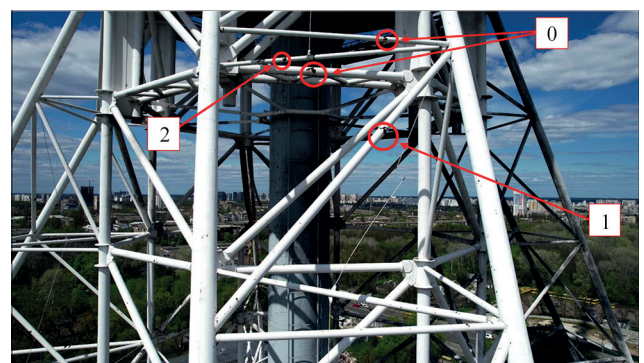


Рис. 2. Фотографія елемента опори, яку отримано за допомогою безпілотного літального апарату при аерофотозйомці телевежі

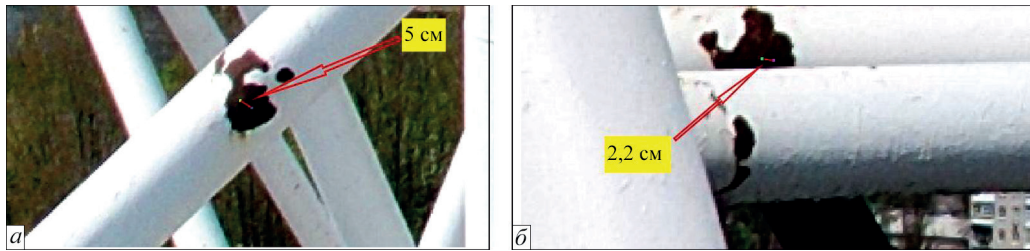


Рис. 3. Фотографії пошкоджень в елементі конструкції телевежі: а – дефект 1, б – дефект 2 (див. рис. 2)

кутів огляду з місць спостереження. Як наслідок це значно ускладнювало завдання загальної оцінки об'ємів руйнації об'єкту в цілому. По-друге, складання повних карт пошкодження елементів без їх просторового огляду потребувало значного часу та залучення великої кількості альпіністів до їх виконання. Крім зазначених причин, необхідно також відзначити проблему ідентифікації дефектів за результатами візуального огляду.

Обстеження металевих та залізобетонних конструкцій із застосуванням безпілотних і роботизованих систем значно зменшують вартість і час перевірки, одночасно підвищуючи надійність і узгодженість отриманих даних. Крім того, скорочення часу простою допомагає продовжувати роботу протягом тривалого періоду, що призводить до покращення працездатності відповідальних об'єктів. Слід також зазначити, що у випадку дослідження небезпечних або важкодоступних зон найефективнішим способом діагностики конструкцій з точки зору операційного ризику, вартості та можливостей є використання дронів [4, 5].

Разом з тим, дрони мають деякі обмеження, які необхідно враховувати. Однією з проблем під час експлуатації дрона є вібрація. БПЛА часто піддаються впливу різних джерел вібрації, що може вплинути на надійність отриманих даних [6]:

- вібрації, спричинені зовнішніми джерелами, наприклад сильний порив вітру;
- вібрації, спричинені маневрами дрону;
- вібрації, спричинені аеродинамічними джерелами, наприклад зустрічний вітер;
- вібрації, спричинені самою системою стабілізації;
- вібрації, спричинені двигунами та пропелерами.

У процесі обстеження телевежі спостерігалися деякі впливи зовнішніх чинників, а саме:

- утворення тіней на трубчастих конструкціях внаслідок хмарної погоди;
- порушення стабілізації внаслідок змінних вітрових потоків;
- зміна кута освітлення об'єкта;
- притягування до металевих конструкцій внаслідок впливу електромагнітного обладнання.

Конкретний час, коли проводиться обліт конструкцій, може істотно вплинути на достовірність результату. Наприклад, тіні, денне світло, погодні умови та сонячна радіація можуть мати негатив-

ний вплив, що призводить до неточних результатів [4].

Застосування методу фотограмметрії для пошуку пошкоджень телевежі. Фотограмметрія – це технологія отримання надійної інформації про фізичні об'єкти та навколишнє середовище за допомогою процесів запису, вимірювання та інтерпретації фотографічних зображень. Як впливає з назви технології, методологія спочатку складалася з аналізу фотографій, однак використання плівкових камер значно зменшилося на користь цифрових сенсорів. Фотограмметрія розширилася, щоб включити аналіз інших записів, таких як цифрові зображення, випромінювана акустична енергія, лазерні вимірювання та магнітні явища [7].

За останні роки фотограмметрія з її можливостями комп'ютерної обробки та залученням нових інструментів збору даних відкрила багато нових сфер застосування: дистанційна візуалізація, робототехніка, віртуальна реальність, 3D анімація тощо [8]. У промисловій інспекції і контролі якості фотограмметричні методи та системи знайшли своє призначен-



Рис. 4. Ділянка телевежі епіцентру вибуху: а – фотографія; б – тривимірна модель

ня у таких сферах, як: автошляхи, мости, трубопроводи, вітрові турбіни, лінії електропередач.

Існує два основних типи фотограмметрії: повітряна (з камерою в повітрі) і наземна (з камерою в руках або на штативі). Наземна фотограмметрія має справу з відстанями до об'єктів близько 200 м, її також називають ближньою фотограмметрією. Малоформатна аерофотограмметрія певним чином використовує ці два типи, поєднуючи точку огляду з повітря з близькими відстанями до об'єктів і високою деталізацією зображення [9].

Метод фотограмметрії базується на геометрично-математичній реконструкції шляхів променів від об'єкта до сенсора цифрової камери в момент експонування, що дозволяє дистанційно визначити дефектні ділянки, отримати точні геометричні розміри пошкоджень та їх розташування на конструкції. Для цього спочатку використовуються алгоритми орієнтації для визначення внутрішніх і зовнішніх параметрів кожного зображення, таких як фокусна відстань, точка центру фокусування, положення й орієнтація камери і точки зйомки. На наступному етапі виконується спільна обробка зображень, вони вирівнюються, щоб забезпечити правильну взаємну позицію та відповідність точок на фото. Після вирівнювання зображень можна визначити 3D-координати точок поверхні об'єкта, використовуючи методи, які базуються на їх відносних позиціях на зображеннях. На основі 3D-координат хмари точок створюється тривимірна модель об'єкта. Після отримання 3D-моделі на основі фотограмметрії проводиться її масштабування.

Для знаходження розмірів дефектів було побудовано 3D-модель Київської телевежі за допомогою програмного забезпечення 3DF Zephyr. Для побудови моделі було використано базу з 2351-ї фотографії, для фінального результату було залучено 1292 фотографії (рис. 1).

Перед початком побудови моделі було проаналізовано всі доступні режими в програмному забезпеченні 3DF Zephyr і експериментально обрано найкращий серед 6-и варіантів [10]:

1. General; 2. Aerial–Nadiral images; 3. Urban; 4. Human body; 5. Surface scan; 6. Vertical structure.

Режими Urban і Human body були одразу відкинуті, тому що їх потрібно використовувати, якщо стоїть завдання побудови 3D-моделі міста з його ландшафтом та різноманітними фасадами будівель або якщо потрібна 3D-модель людини з точними розмірами її тіла.

Режим General є універсальним і з його допомогою можливо виконати поставлене завдання, але при цьому постає проблема з визначенням розмірів дефектів. Цей режим не дає достатньої точності розмірів елементів конструкції та унеможливує вимірювання відстані з точністю до мм.

Aerial–Nadiral images — режим, який створено для роботи з даними, що надають БПЛА. При використанні такого режиму виникла проблема з подво-

єнням елементів та їх невизначеною орієнтацією в просторі. Оскільки обстеження вежі проводилося на різних висотах та під різними кутами, це було головною проблемою для даного режиму, адже для оптимальної побудови моделей в Aerial–Nadiral images потрібні фото, які знято з однієї висоти з напрямком згори вниз до обстежуваного об'єкту.

Surface scan підійшов би, якби потрібно було проаналізувати невелику ділянку конструкції. Також для цього потрібні зображення з максимальною близької відстані до об'єкта. Дрон не може підлетіти ближче ніж 1 м до об'єкта, тому що спрацьовують захисні вмонтовані датчики, які блокують керування ним. Проблема з неправильною орієнтацією елементів в просторі в даному режимі теж присутня.

Було визначено, що Vertical structure є оптимальним для побудови моделі Київської телевежі. За допомогою нього вдалося вирішити поставлені завдання.

Для створення 3D-моделі було використано графічну станцію Dell Precision 3650 Tower з наступними характеристиками:

Процесор 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-11700 @ 2.50GHz; пам'ять 32 GB (4·8 GB); диск 512 SSD; відеокарта Nvidia T1000 4 GB; операційна система Windows 10 Pro.

Робота з великим обсягом даних є трудомісткою, адже процеси створення моделей можуть тривати декілька днів, а то і тижнів. У нашому випадку для отримання фінального результату була потрібна безперервна робота графічної станції близько 36 год.

Після побудови чорнового варіанту 3D-моделі почався наступний етап роботи, а саме її обробка. Фільтруються зайві елементи графіки, підбираються оптимальні параметри для найкращого огляду моделі та виявлення дефектів. Після цього отримується фінальна 3D-модель (рис. 1).

На рис. 2 показано дефекти, які утворилися внаслідок вибуху ракети. Дефект 0 являє собою руйнування захисного покриття елемента конструкції та не є небезпечним для вежі у короткостроковій перспективі. Дефекти 1 і 2 — це отвори, які утворилися внаслідок проникнення уламка крізь стінку труби і через них потрапляє вода та волога в середину трубчастих елементів, що призводить до їх корозії, суттєвого зниження характеристик міцності.

На основі аналізу фотографій та їх проєкцій на цифрову тривимірну модель, яку було отримано методом фотограмметрії, було визначено характерні розміри цих дефектів. Так, наприклад, за допомогою інструмента Measures було встановлено, що діаметр першого дефекту становить приблизно 5 см (рис. 3, а), а другого — 2,2 см (рис. 3, б). Варто зазначити, що ці дефекти було виявлено на найменш пошкодженій опорі телевежі.

3D-модель дозволила вдало візуалізувати великі пошкодження з їх реальним виглядом та розмірами (рис. 4).

Проведенні роботи з обстеження Київської телевежі допомогли оцінити дефекти та розробити рекомендації для ремонту.

Висновки

Проведено обстеження пошкоджень трубчастих конструкцій Київської телевежі за допомогою методів неруйнівного контролю та візуального обстеження дроном з подальшим використанням методу фотограмметрії. Побудована 3D-модель допомагає локально виявити розташування дефектів на елементах конструкції та візуалізувати результати діагностики, визначити розмір дефектів та класифікувати їх. Використовуючи дистанційну візуальну інспекцію за допомогою БПЛА, вдалося знайти пошкодження, які не було ідентифіковано методами неруйнівного контролю, та критичні дефекти, які можуть становити загрозу для безпеки експлуатації об'єкта або призвести до серйозних проблем з його функціонуванням, та потребують термінового ремонту для того, щоб зменшити ризик аварійного випадку та забезпечити безпеку експлуатації об'єкта. Побудовану тривимірну модель може бути використано для чисельних розрахунків напружено-деформованого стану Київської телевежі для аналізу просторового розподілу напружень у вузлах та елементах її конструкції. Отримані дані дозволили розробити рекомендації щодо оперативного ремонту та відновлення телевежі. Представлені результати демонструють високий потенціал поєднання традиційних методів неруйнівного контролю якості з технологією дистанційної діагностики на основі застосування БПЛА та фотограмметрії для обстеження великогабаритних конструкцій відповідального призначення.

Подяка

Опубліковані результати отримані в рамках реалізації проекту 022.01/0095 «Розробка технології дистанційної діагностики пошкоджених великогабаритних об'єктів на основі застосування

безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та фотограмметрії», за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Автори висловлюють також подяку корпорації 3Dflow за надане цифрове забезпечення 3DF Zephyr та технічну підтримку у рамках програми 3Dflow for the Ukrainian Crisis [10]. Автори вдячні за можливість використовувати цей потужний інструмент у своїх дослідженнях і вважають, що він допоміг успіху їхньої роботи.

Список літератури/References

1. Parham Nooralishahi, Clemente Ibarra-Castanedo, Shakeb Deane et al. (2021) Drone-Based Non-Destructive Inspection of Industrial Sites: a review and case studies. *Drones*, 5(4), 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones5040106>
2. Лобанов Л.М., Гарф Э.Ф., Копылов Л.Н., Синеок А.Г. (2013) Сварка при возведении башни киевского телецентра. *Промислове будівництво на інженерні споруди*, 3, 16–20. Lobanov, L.M., Garf, E.F., Kopylov, L.N., Sineok, A.G. (2013) Welding construction of Kyiv TV tower. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, 3, 16–20 [in Russian].
3. Демьянов И.А., Мурашов А.П., Борисов Ю.С. и др. (2005) Применение электродуговой металлизации для антикоррозионной защиты телевизионной башни в Киеве. *Сварщик*, 3, 19–21. Demyanov, I.A., Murashov, A.P., Borisov, Yu.S. et al. (2005) Application of electric arc metallization for anticorrosion protection of TV tower in Kiev. *Svarshchik*, 3, 19–21 [in Russian].
4. Nenad Gucunski, Hung Manh La, Kien Dinh, Mustafa Khudhair (2023) Advancing condition assessment of reinforced concrete bridge elements through automation, visualization, and improved interpretation of multi-NDE technology data. *Materials Evaluation*, 81(1), 56–66. DOI: <https://doi.org/10.32548/2023.me-04289>
5. Rok Cajzek, Uroš Klanšek (2016) An unmanned aerial vehicle for multi-purpose tasks in construction industry. *Journal of applied engineering science*, 14(2), 314–327. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes14-10918>
6. Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, Benjamin E. Wilkinson (2014) *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4th Edition, 2014.
7. Zhilin Li, Jun Chen, Emmanuel Baltsavias (2008) *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. ISPRS Congress Book.
8. James, S. Aber, Johannes, B. Ries (2010) *Small-Format Aerial Photography*. ISBN: 978-0-444-53260-2.
9. [https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/Copyright © 2023 by 3Dflow srl](https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-documentation/Copyright%20%20%202023%20by%203Dflow%20srl)
10. [https://www.3dflow.net/3dflow-for-the-ukrainian-crisis/\(3 March 2022\)](https://www.3dflow.net/3dflow-for-the-ukrainian-crisis/(3%20March%202022))

REMOTE ASSESSMENT OF DAMAGE TO KYIV TV TOWER BASED ON THE APPLICATION OF AERIAL PHOTOGRAPHY AND PHOTOGRAMMETRY METHOD

L.M. Lobanov¹, D.I. Stelmakh¹, V.V. Savitsky¹, V.P. Diadin¹, O.P. Shutkevych¹, A.G. Kozachek²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: d.stelmakh1996@gmail.com

²Concern of radio broadcasting, radio communication and television. 10 Dorohozhytska str., 04112, Kyiv, Ukraine.

E-mail: a.kozachek@rrt.ua

The paper is devoted to application of the methods of nondestructive testing and visual examination using UAV (drones) for evaluation of damage of the TV tower structure. A methodology is described, which includes application of aerial photography and photogrammetry method to construct a 3D model of the TV tower and localize the damage. 3DF Zephyr software was used to plot a 3D-model, which allowed sizing the defects and classifying them. Conducted examination provided the grounds for elaboration of the recommendations on operative repair and restoration of the TV tower to ensure its safe operation. The presented results confirm the high potential of the combination of the traditional nondestructive testing methods with remote diagnostics based on application of drones and photogrammetry for examination of large-sized structures. 10 Ref., 4 Fig.

Keywords: UAV (drone), photogrammetry, nondestructive testing, 3D-model, visualization, TV tower

Надійшла до редакції 31.05.2023