

УДК 624.131.5:004.896:699.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.95.1179

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ТЕХНІКИ З ІІІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ ПОКРІВЕЛЬ

ДІКАРЕВ К. Б.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

ГРИГОРОВИЧ М. С.², здоб.,

НЕЧЕПУРЕНКО Д. С.³ канд. техн. наук, доц.

ВАРЯНИЧКО М. О.⁴, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технологій будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

² Кафедра технологій будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: nik27mil@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9292-4790

⁴ Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 369-04-13, e-mail: varianichko.mari@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4546-1383

Анотація. Актуальність. Війна в Україні призвела до численних руйнувань, зокрема в Дніпропетровській області, що робить використання роботизованих технологій для обстеження пошкоджених будівель, особливо дахів, важливим і терміновим завданням. Падіння уламків ракет і дронів «Shahed 136», що супроводжуються масштабними руйнуваннями, збільшує потребу в оперативних та точних методах оцінки пошкоджень, зокрема дахів. Застосування роботизованої техніки, оснащеної штучним інтелектом (ІІІ) та тепловізійними камерами для діагностики дефектів покрівель є одним з найперспективніших підходів. Ці технології дозволяють виявляти приховані дефекти та проблеми з мінімальним впливом на експлуатацію будівель, що особливо важливо в умовах післявоєнного відновлення. Оперативна оцінка стану покрівель є необхідною для ефективного управління ремонтними роботами та забезпечення довговічності інфраструктури після війни. **Мета статті.** Метою статті є обґрунтування ефективності використання роботизованої техніки з ІІІ для інспекції покрівель, зокрема для виявлення дефектів і пошкоджень на дахах, а також визначення економічної доцільності та технічного потенціалу таких технологій у сучасному будівництві та відновленні пошкоджених будівель. Стаття досліджує, як ці технології можуть сприяти швидшим, безпечнішим та економічнішим інспекціям. Крім того, розглядаються можливості впровадження цієї технології в контексті післявоєнного відновлення інфраструктури в Україні, особливо в Дніпропетровській області, де зафіксовано значні пошкодження. Результати дослідження також мають важливе значення для адаптації світового досвіду до українських умов та підготовки необхідної нормативної бази для широкого впровадження цих технологій у процес відновлення. **Висновки.** Використання роботизованої техніки з тепловізорами та ІІІ є економічно вигідним, технічно ефективним і безпечним методом для діагностики покрівель. Застосування цієї технології дозволяє значно скоротити час і витрати на інспекції, мінімізувати людські ризики та забезпечити високу точність діагностики. Технологія дозволяє своєчасно виявляти приховані дефекти, такі як волога під покриттям, протікання, втрату теплоізоляції, а також механічні пошкодження матеріалів покрівель, що значно зменшує ймовірність потреби в дорогих ремонтах. У контексті післявоєнного відновлення України ці технології мають потенціал стати стандартом для швидкої та безпечної оцінки пошкоджених будівель. Дослідження є необхідним для адаптації світового досвіду до українських умов і для розвитку нормативної бази, що підтримує використання таких інноваційних технологій у будівництві та ремонті.

Ключові слова: роботизована техніка з ІІІ; інспекція покрівель; відновлення інфраструктури; безпека

RELEVANCE OF RESEARCH ON INNOVATIVE SOLUTIONS FOR DETECTING DEFECTS IN FLAT ROOFS

DIKAREV K.B.^{1*}, Ph.D. (Tech. Sc.), Assoc. Prof.,

HRYNOROVYCH M.S.², Applicant,

NECHEPURENKO D.S.³, *Ph.D. (Tech. Sc.), Assoc. Prof.*,
VARIANYCHKO M.O.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: kdikarev@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

² Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: nik27mil@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493

³ Department of Organization and Construction Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: Nechepurenko.daria@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9292-4790

⁴ Department of Building and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 369-04-13, e-mail: varianichko.mari@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4546-1383

Abstract. Relevance. The war in Ukraine has led to numerous destructions, particularly in the Dnipropetrovsk region, making the use of robotic technologies for inspecting damaged buildings, especially roofs, an important and urgent task. The falling debris from rockets and "Shahed 136" drones, accompanied by widespread destruction, increases the need for prompt and accurate methods for assessing damage, particularly to roofs. The application of robotic technology equipped with artificial intelligence (AI) and thermal imaging cameras for diagnosing roof defects is one of the most promising approaches. These technologies allow for the detection of hidden defects and problems with minimal impact on the operation of buildings, which is especially important in the context of post-war reconstruction. The rapid assessment of roof conditions is essential for the effective management of repair works and ensuring the long-term durability of infrastructure in the aftermath of the war. **Objective.** The aim of the article is to justify the effectiveness of using robotic technology with AI for roof inspections, specifically for detecting defects and damage to roofs, and to determine the economic feasibility and technical potential of such technologies in modern construction and the restoration of damaged buildings. The article examines how these technologies can contribute to faster, safer, and more cost-effective inspections. Additionally, it discusses the possibilities of implementing this technology in the context of post-war infrastructure recovery in Ukraine, particularly in the Dnipropetrovsk region, where extensive damage has been reported. The findings are also relevant for adapting global experience to Ukrainian conditions and preparing the necessary regulatory framework for widespread adoption of these technologies in the restoration efforts. **Conclusions.** The use of robotic technology with thermal imaging and AI is an economically beneficial, technically efficient, and safe method for roof diagnostics. The application of this technology allows for significant reductions in inspection time and costs, minimizes human risks, and ensures high diagnostic accuracy. The technology enables timely detection of hidden defects such as moisture under the covering, leaks, loss of insulation, and mechanical damage to roofing materials, which significantly reduces the likelihood of costly repairs. In the context of Ukraine's post-war reconstruction, these technologies have the potential to become the standard for fast and safe assessments of damaged buildings. The research is necessary for adapting global experience to Ukrainian conditions and for developing a regulatory framework that supports the use of such innovative technologies in construction and repair.

Keywords: *robotic technology with AI; roof inspection; infrastructure restoration; safety*

Вступ. Розвиток безпілотних технологій відкриває нові можливості для обстеження будівельних конструкцій, зокрема покрівель. Дрони, оснащені штучним інтелектом (ШІ) та тепловізійними камерами, здатні швидко й безпечно виявляти приховані дефекти дахів, які важко помітити традиційними методами. У цьому звіті проаналізовано економічну доцільність використання таких дронів, їхні технічні переваги, розглянуто успішні приклади впровадження у США та Європі, а також описано стан використання технології в Україні (в тому числі у Дніпропетровській області). Наприкінці наведено короткий

огляд альтернативних роботизованих систем з ШІ для моніторингу покрівель.

Економічна доцільність використання дронів. Використання дронів для інспекції покрівель суттєво скорочує витрати та час порівняно з традиційними методами. За даними галузевих досліджень, впровадження дронів дозволяє зменшити тривалість огляду об'єкта до 85 % та скоротити витрати на моніторинг до 70 % [1]. Економія досягається за рахунок відмови від дорогих будівельних риштувань, автовишок та драбин – дрону не потрібне спеціальне обладнання для доступу на дах [2].

Наприклад, один політ дрона займає лише кілька хвилин, тоді як ручний огляд великого даху вимагав би годин роботи на висоті [3]. Це дозволяє виконувати більше інспекцій за той самий час і з меншими трудовими витратами. Безпілотні інспекції значно підвищують безпеку та знижують ризики для персоналу. Працівникам більше не потрібно підніматися на висоту – дрон виконує цю роботу, усуваючи ризик падіння чи травм. За оцінками, застосування дронів знижує травматизм під час огляду дахів приблизно на 35 % [1]. Відповідно, зменшуються витрати на страхування робіт і компенсації: страхові премії можуть бути меншими, оскільки менше людей наражаються на небезпеку [2]. Крім того, дрон мінімізує перерви в роботі об'єкта: огляд можна провести швидко, без евакуації мешканців чи припинення виробничих процесів [6], що опосередковано економить кошти від відсутності простоїв. Економічна ефективність підтверджується практикою. Так, британська житлова асоціація Yorkshire Housing після впровадження дронів оцінила, що цільовий ремонт покрівель (на основі даних аерозйомки) обійдеться у десять разів дешевше, ніж плановий капітальний ремонт,

який спочатку вважався необхідним. Дрони дають змогу перейти від реактивного ремонту до проактивного: регулярний моніторинг і профілактика економлять близько 12–18 % витрат порівняно з ремонтом після аварій. Ще один приклад – рада графства Ренфрушир (Шотландія) повідомила про щорічну економію у кілька мільйонів фунтів завдяки зниженню витрат на інспекції та оптимізації строків експлуатації дахів, що дозволило відстрочити дорогі заміни. Отже, швидка окупність інвестицій є цілком реальною: витрати на придбання дрона та програм ШІ компенсуються за рахунок зменшення трудових ресурсів і уникнення дорогих аварійних ремонтів. Досвід показує, що економія може сягати десятків відсотків бюджету проєкту, а у деяких випадках – забезпечувати багатократне повернення інвестицій [4].

Технічні переваги та можливості. Тепловізійне зображення покрівлі, яке демонструє ділянку прихованої вологи (позначено червоним) рис. Дрони з тепловізорами виявляють такі дефекти, невидимі неозброєним оком, завдяки аналізу температурних аномалій [6].



Рис. Ділянка покрівлі з прихованою вологістю, виявленою тепловізійним методом

Застосування дронів із камерами високої роздільної здатності та тепловізорами забезпечує високу точність

діагностики стану даху. Безпілотник може зробити сотні детальних фотографій покрівлі з різних ракурсів і побудувати

ортофотоплан (мозаїку) всієї покрівлі з прив'язкою до координат. Це дає повну картину поверхні даху, включно з важкодоступними зонами, з точністю до окремої черепиці чи тріщини. На основі цих даних алгоритми комп'ютерного зору (штучного інтелекту) аналізують кожен квадратний сантиметр поверхні і автоматично розпізнають дефекти [5]. Сучасні AI-системи здатні виявляти найпоширеніші проблеми покрівель.

- Протікання та волога під покриттям – тепловізор фіксує зони підвищеної вологості або мокрої теплоізоляції, які мають іншу температуру. Наприклад, дрон помічає вологу, що накопичилася під мембраною плоскої покрівлі, ще до появи явних протікань [6].

Це дозволяє запобігти розвитку пошкодження до стадії, коли потрібний капітальний ремонт.

- Пошкодження покрівельного матеріалу – алгоритми ШІ розпізнають тріщини, відсутні або зламані черепиці, діри в рулонному покритті, здуття мембран тощо. Наприклад, система може автоматично знайти відсутні гонтові елементи на основі порівняння з еталонними зображеннями даху.

- Накопичення води (стояча вода) – для плоских промислових дахів AI-моделі виявляють зони застою води, що вказує на проблеми з дренажем.

Раннє виявлення таких місць допомагає уникнути протікань і пошкодження конструкцій.

- Сліди граду та механічні ушкодження – дрони з високою роздільною здатністю помічають дрібні вм'ятини чи сколи на покрівлі. ШІ-модуль, навчений на базі зображень, здатен розрізнити ушкодження від граду на черепиці чи металічних листах.

Це актуально для оцінки страхових випадків після буревіїв.

- Корозія та іржа на металевих елементах – аналіз кольору і текстури фото дозволяє виділити іржаві фрагменти покрівельного покриття або кріплення.

- Біологічні нарости – AI може класифікувати ділянки з мохом, лишайником або водоростями на даху, що вказує на затримку вологи і потенційно шкодить покриттю.

- Втрата теплоізоляції – тепловізор чітко показує витоки тепла через покрівлю. На термограмі такі місця проявляються нагрітими зонами взимку або прохолодними – влітку. Це дає змогу знайти ділянки з пошкодженням або відсутнім утепленням

Вимірявши температурний градієнт, програмне забезпечення оцінює, де теплоізоляція потребує ремонту чи заміни. Перевагою є комплексність даних: поєднання оптичних зображень і теплових карт дозволяє всебічно оцінити стан даху. За один виліт дрон збирає повний набір даних, який одразу завантажується в систему аналізу. Сертифікований оператор або автоматизований алгоритм може миттєво сформулювати звіт з переліком знайдених дефектів та їхнім точним розташуванням на плані даху. Це скорочує людський фактор при діагностиці і підвищує об'єктивність обстеження. Важливо, що огляд дрона є неруйнівним і безконтактним. На відміну від людини, дрон не навантажує покрівлю своєю вагою і не ризикує пошкодити старе покриття під час обходу. Інспекція виконується на відстані, тому не порушується цілісність даху в ході обстеження. Крім того, дрони можуть працювати у важкодоступних місцях, куди людині дістатися важко або небезпечно – наприклад, над скляними дахами, крутонахиленими черепичними покрівлями, у великих цехах зі слабким перекриттям тощо. Вони здатні літати на висоті до 100 м і проводити тепловізійний аналіз без ризику для спеціаліста [1; 2].

Дрони успішно працюють у різних погодних умовах, хоча є оптимальні режими для точних вимірювань. Як правило, тепловізійну зйомку рекомендується проводити вранці або ввечері, коли дах або охолов після сонця, або зберіг достатньо тепла – це підсилює контраст температур і полегшує виявлення вологи. Бажано виконувати польоти в суху погоду (після

дощу покрівля повинна просохнути) та за відсутності сильного вітру, щоб дрон був стабільним. Сучасні моделі дронів оснащені системами стабілізації й можуть літати навіть при помірному повітрі, а також вночі – для цього тепловізору не потрібне видиме світло. Таким чином, інспекцію можна планувати гнучко, підлаштовуючись під погоду і графік власника будівлі, щоб отримати найякісніші дані [6]. В останні роки технічні можливості таких систем зросли, а вартість – зменшилася. Якщо 5–7 років тому обладнання було дорогим і

рідкісним, то тепер дрони та сенсори стали доступнішими для масового використання в будівництві [5]. Зниження цін на тепловізори та камерні модулі спрощує оснащення дронів необхідними сенсорами. Це робить технологію більш економічно виправданою (як згадувалося вище) і технічно здійсненою навіть для невеликих компаній. Для більш наочного представлення порівняння традиційних методів інспекції покрівель і новітніх технологій з дронами та ШІ, представлена таблиця.

Таблиця

Порівняння методів інспекції покрівель

Параметр	Традиційний метод (люди з пристроями)	Метод з дронами та ШІ
Кількість людей	2–4 особи	1 оператор
Час виконання інспекції	4–6 годин	1–2 години
Витрати (кошторис)	Високі (оренда обладнання, зарплати)	Низькі (один політ)
Ризик для здоров'я	Високий (робота на висоті)	Мінімальний (відсутність необх. підніматися на дах)
Точність виявлення дефектів	Залежить від досвіду спеціаліста	Висока (автоматичне виявлення дефектів ШІ)
Доступ до важкодоступних місць	Обмежений (не всі частини покрівлі доступні)	Повний доступ (немає обмежень за умовами)

Приклади впровадження дронів з ШІ.

Американські компанії та муніципалітети активно впроваджують дрони для інспекції покрівель і будівель. Наприклад, компанія Zeitview (DroneBase) розробила AI-платформу, яка аналізує знімки дахів великих комерційних будівель. Вона накладає результати аналізу на двовимірний план даху і точно вказує місця найменших пошкоджень [5] – від слідів граду до ділянок зі скупченням сміття чи відшаруванням мембрани. Це дозволяє обслуговуючим компаніям оперативно планувати ремонт тільки там, де це потрібно. Ще один кейс – енергоаудит будівель за допомогою дронів. У місті Уоррен (штат Міннесота) ще у 2017 році запустили ініціативу тепловізійного картування всього міста з повітря. Студенти місцевого коледжу за допомогою дронів зняли в інфрачервоному діапазоні всі будівлі містечка, щоб виявити, де саме витрачається тепло. Результати були представлені мешканцям – на теплових

картах було чітко видно, які дахи, стіни чи вікна втрачають найбільше енергії [7]. На основі цих даних місто запропонувало програму кредитування утеплення, щоб люди могли усунути проблемні місця і зекономити на опаленні. Цей випадок демонструє масштабованість технології: дрони здатні швидко обстежити навіть сотні будівель, надаючи цінну інформацію для управління цілим містом.

У приватному секторі США дрони з ШІ стали інструментом страхових компаній та покрівельних підрядників. Страхові інспектори використовують дрони після ураганів чи градів, щоб безпечно оцінити збитки на дахах будинків, не чекаючи коли бригади зможуть фізично оглянути кожен будівлю. Це прискорює виплати та ремонт. Покрівельні компанії, своєю чергою, залучають дрони для підготовки кошторисів – автоматизований огляд даху визначає обсяг пошкоджень і навіть може оцінити необхідну кількість матеріалів для ремонту.

За повідомленнями, одна інспекція дроном займає лише кілька годин проти кількох днів ручної роботи, що дає змогу підрядникам обслуговувати більше клієнтів за менший час [8].

У країнах Європи технологія також набуває поширення як серед комерційних структур, так і в публічному секторі. Британський приклад з *Yorkshire Housing* вже згадувався – після пробних польотів керівництво оцінило великий потенціал економії і безпеки. У результаті ця та інші житлові організації почали ширше застосовувати дрони для періодичних оглядів фонду житла. Інший приклад у Великій Британії: муніципалітет Renfrewshire завдяки дронам оптимізував планові ремонти дахів, заощадивши значні кошти (понад 2 млн фунтів на рік) [4]. Європейські міста також відзначають, що профілактика витоків за допомогою регулярного моніторингу дешевша, ніж ліквідація наслідків аварій.

Для історичних та громадських будівель дрони стали справжнім порятунком. У Нідерландах, наприклад, постала проблема обстеження даху старовинної залізничної станції початку XX століття. Металеві ферми під дахом викликали підозри у корозії, але дістатися до них було вкрай складно – потрібне було б зведення риштувань, що зупинило б рух потягів через станцію. Замість цього адміністрація залучила спеціалізований дрон Flyability Elios 3 (обладнаний захисною рамкою для польотів у закритих приміщеннях). Дрон безпечно пролетів у вузькому просторі під дахом і зібрав необхідні дані без жодного простою для станції [9]. Отримані фото та 3D-сканування LiDAR дозволили інженерам оцінити стан металевих балок і спланувати ремонтні роботи точково, без “про всяк випадок” заміни всього даху. Цей кейс демонструє, що роботизовані дрони можуть обстежувати навіть складні об’єкти (великі ангари, храми, транспортні вузли), де традиційні методи незручні або небезпечні.

В цілому, у США та Європі сформувався цілий ринок послуг з аеродіагностики дахів. Працюють як великі

корпорації, так і невеликі стартапи, що пропонують аутсорсингові послуги огляду покрівель з допомогою дронів. Це дозволяє навіть невеликим керуючим компаніям або ОСББ замовити таку інспекцію при потребі, не інвестуючи в власний дрон. Досвід впровадження показав високу ефективність: швидкість, точність та безпечність дронів підтверджені численними реальними проектами, що задає новий стандарт у сфері будівельного обстеження.

Стан використання технології в Україні. В Україні застосування дронів для моніторингу покрівель знаходиться на початковому етапі, але демонструє перспективність. Світовий лідер у цій галузі – компанія DJI – представлений і на українському ринку, тож необхідне обладнання є доступним [10]. Вже працюють перші спеціалізовані фірми, що надають послуги технічного обстеження будівель з повітря. Наприклад, компанія Solar-M заявляє про комплексні рішення з використання дронів для оцінки стану дахів і фасадів, виконання тепловізійних зйомок та 3D-моделювання споруд [11]. Подібні структури пропонують швидке виявлення тепловтрат у житлових і промислових будівлях, що свідчить про попит на енергоаудит дронами і в Україні. У науковій спільноті теж зростає інтерес: з’являються дипломні роботи та дослідження щодо застосування БПЛА в обстеженні будівель. В них зазначається, що за допомогою дронів можна оцінити якість утеплення фасадів і дахів, виявити проникнення вологи та інші дефекти безконтактно. Окремо підкреслюється підвищення безпеки та прискорення оглядів висотних конструкцій. Тобто, фахівці усвідомлюють переваги цієї технології і працюють над її впровадженням у вітчизняну практику. Втім, широке впровадження дещо стримується рядом факторів. По-перше, регуляторна база. Станом на початок 2020-х в українських нормах з технічного обстеження будівель не було прямих згадок про використання дронів [10].

Відповідно, інженерам часто доводиться діяти на власний розсуд, не маючи чітких

стандартів виконання та оформлення таких оглядів. Це питання поступово вирішується – наприклад, у 2022 році була затверджена методика обстеження будівель, пошкоджених внаслідок бойових дій, де допускається використання фото- та відеофіксації з дронів як додаткового джерела даних. Очікується, що з часом будівельні ДБН будуть оновлені із врахуванням нових технологій. По-друге, інтеграція в повітряний простір. Пільоти дронів регулюються авіаційними правилами, і в містах, зокрема в Дніпропетровській області потрібні дозволи для польотів, аби гарантувати безпеку і невтручання в роботу аеропортів тощо. Це організаційне питання, яке вирішується завчасним плануванням польоту та координацією з органами управління повітряним рухом [9].

В Україні вже є приклади такої координації – зокрема, при зйомках дронами великих об'єктів у містах операторам доводиться отримувати дозволи від Державіаслужби. З розвитком “Армії дронів” в умовах війни 2022–2023 років законодавство щодо БПЛА зазнало змін, але переважно у військовій сфері; у цивільному секторі стандарти польотів для інспекцій ще формуються. По-третє, війна в Україні створила особливий контекст для використання дронів. У Дніпропетровській області, як і в інших прифронтових регіонах, головним пріоритетом є застосування безпілотників у воєнних цілях. Водночас, на жаль, бойові дії призвели до масових пошкоджень будівель, зокрема покрівель, і виникла потреба швидко їх обстежувати. Тут дрони могли б стати в пригоді для фіксації наслідків обстрілів (без ризику для життя інженерів) і оцінки стану конструкцій. На державному рівні вже розроблені методики обстеження зруйнованих об'єктів, які передбачають застосування фотофіксації з БПЛА як частину процедури [10]. Деякі волонтерські та комерційні ініціативи допомагають громадянам обстежити пошкоджені будинки – зокрема, використовуються дрони для огляду дахів після ракетних ударів. Хоча це

не завжди висвітлюється публічно, можна очікувати, що найближчим часом технологія отримає більше поширення саме для відновлення інфраструктури. У самому ж мирному будівництві України дрони поки застосовуються переважно для геодезії та моніторингу буд майданчиків, але інтерес до інспекції існуючих будівель зростає. Великі будівельні компанії починають брати приклад з Заходу: за останні 5 років використання дронів у будівництві виросло на 239 % у світі, і понад 65 % великих будівельних фірм вже застосовують дрони для моніторингу та оглядів [1].

В Україні цей тренд також поступово проявляється. У Дніпропетровській області, зокрема, є промислові підприємства і ЖКГ, які цікавляться повітряною діагностикою своїх об'єктів. Наразі інформація про масове використання саме у Дніпрі чи області обмежена, але поодинокі проекти реалізуються (наприклад, енергоаудит кількох громадських будівель з тепловізійною зйомкою, приватні замовлення на огляд дахів перед ремонтом тощо). Можна прогнозувати, що після завершення війни та з відновленням економіки попит на такі послуги різко зросте – адже доведеться обстежити та відремонтувати величезну кількість пошкоджених будівель, і безпілотні технології тут стануть у великій пригоді.

Інші роботизовані технології з ШІ для моніторингу покрівель. Окрім дронів, існують інші роботизовані рішення для інспекції дахів, що використовують штучний інтелект. Наприклад, роботизовані краулери (гусеничні або колісні) оснащені камерами та сенсорами, які здатні пересуватися по поверхні даху чи інших конструкціях. Ці роботи ефективно працюють у важкодоступних місцях, таких як старі будівлі, де простір обмежений для польоту дронів. Вони можуть автоматично передавати зображення та зберігати дані огляду, а алгоритми ШІ допомагають аналізувати наявність тріщин та аномалій. Іншим варіантом є чотириногі роботи (робопси), які здатні пересуватися сходами та нерівними поверхнями, несе різні сенсори

(камери, тепловізори). Вони можуть автономно оглядати великі плоскі дахи, фіксуючи різноманітні аномалії, такі як втрата тепла або волога на поверхні. Отримані дані аналізуються ШІ для виявлення відхилень [12]. Крім того, існують стаціонарні системи моніторингу, що складаються з камер або сенсорів, встановлених на будівлі, що забезпечують безперервний контроль стану даху. Ці системи можуть виявляти зміни в стані покрівлі та автоматично сигналізувати про протікання.

Попри це, дрони, завдяки своїй здатності швидко охоплювати великі площі та надавати повну картину, залишаються найбільш ефективним та універсальним рішенням для моніторингу дахів. Технології роботизованих краулерів, робопсів та стаціонарних систем доповнюють використання дронів, що формує тенденцію до автоматизації та роботизації будівельного моніторингу.

Висновки

Дослідження показує, що застосування роботизованих дронів, оснащених штучним інтелектом та тепловізорами, є цілком доцільним і вигідним для виявлення дефектів покрівель. Економічні переваги включають суттєве зниження вартості та тривалості інспекцій, зменшення потреби в робочій силі та підйомному обладнанні, підвищення безпеки і скорочення ризиків для людей [1]. На практиці це приводить до

скорочення аварійних витрат і подовження строку служби дахів завдяки вчасному ремонту [4]. Технічно дрони забезпечують високу точність і повноту обстеження: вони виявляють приховані проблеми (вологу під покриттям, тепловтрати, дрібні пошкодження) та охоплюють навіть важкодоступні зони [5]. Штучний інтелект автоматизує аналіз даних, що підвищує об'єктивність і швидкість отримання результатів. Зарубіжний досвід (США, ЄС) підтверджує ефективність технології – накопичено багато успішних кейсів, де дрони дозволили зекономити кошти і покращити управління об'єктами [7]. В Україні ця технологія тільки починає впроваджуватися, але має великі перспективи. В контексті післявоєнного відновлення попит на швидкі та безпечні обстеження будівель буде надзвичайно високим, і дрони з ШІ можуть стати незамінним інструментом для оцінки стану покрівель. Очікується, що з удосконаленням нормативної бази та появою успішних місцевих проектів, довіра до технології зростатиме, а її використання стане поширеним і в нашій країні. Таким чином, роботизовані дрони з тепловізорами – це сучасний, ефективний і економічно виправданий підхід до моніторингу покрівель, який уже сьогодні приносить користь і має всі шанси стати стандартом у найближчому майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інноваційні підходи до будівельного моніторингу : дрони, економія та безпека. URL: <https://learn.ztu.edu.ua>
2. 5 причин використовувати дрони для інспекції дахів. URL: <https://info.qii.ai>
3. Тепловізор FLIR для повітряної термографії. URL: <https://dsystems.com.ua>
4. Технологія дронів для обслуговування житла : звіти Yorkshire Housing та Renfrewshire Council. URL: <https://cp-catapult.s3.amazonaws.com>
5. Використання новітніх технологій : інспекція дахів з ШІ. URL: <https://roofingelementsmagazine.com>
6. 7 основних переваг тепловізійної інспекції дахів дронами у 2025 році. URL: <https://www.linkedin.com>
7. Як тепловізійні дрони сприяють енергетичній революції міст. URL: <https://enterprise-insights.dji.com>
8. Трансформація покрівельної галузі за допомогою ШІ : від інспекції до кошторису. URL: <https://dev.to>
9. Дрони Elios підвищують ефективність огляду покрівель залізничної станції у Нідерландах. URL: <https://flyability.com>
10. Застосування БПЛА для енергоаудиту та обстеження будівель. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua>
11. Послуги дронів : геодезія, 3D-моделювання, енергоаудит. URL: <https://drones.solar-m.com.ua>
12. TOBOR X-BOT Xplorer – робот для інспекції. URL: <https://inspectoroutlet.com>

REFERENCES

1. *Innovatsiyni pidkhody do budivel'noho monitoringu : drony, ekonomiya ta bezpeka* [Innovative approaches to construction monitoring : drones, cost savings, and safety]. URL: <https://learn.ztu.edu.ua> (in Ukrainian).
2. *5 prychyn vykorystovuvaty drony dlya inspektsiyi dakhiv* [5 Reasons Why You Should Use Drones for Roof Inspections]. URL: <https://info.qii.ai> (in Ukrainian).
3. *Teplovizor FLIR dlya povitryanoyi termohrafiyi* [FLIR thermal camera for aerial thermography]. URL: <https://dsystems.com.ua> (in Ukrainian).
4. *Tekhnolohiya droniv dlya obsluhovuvannya zhytla : zvity Yorkshire Housing ta Renfrewshire Council* [Drone Technology for Housing Maintenance : Reports from Yorkshire Housing and Renfrewshire Council]. URL: <https://cp-catapult.s3.amazonaws.com> (in Ukrainian).
5. *Vykorystannya novitnikh tekhnolohiy : inspektsiya dakhiv z SHI* [Leveraging New Tech : Roof Inspection Gets an AI Upgrade]. URL: <https://roofingelementsmagazine.com> (in Ukrainian).
6. *7 osnovnykh perevah teplovizyynoyi inspektsiyi dakhiv dronamy u 2025 rotsi* [The 7 Major Benefits of Drone Thermal Roof Inspections in 2025]. URL: <https://www.linkedin.com> (in Ukrainian).
7. *Yak teplovizyyni drony spryyayut' enerhetychniy revolyutsiyi mist* [How Thermal Drone Roof Inspections Are Key to a City's Energy Revolution]. URL: <https://enterprise-insights.dji.com> (in Ukrainian).
8. *Transformatsiya pokrivel'noyi haluzi za dopomohoyu SHI: vid inspektsiyi do koshtorysu* [AI Transforming the Roofing Industry: From Drone Inspections to Cost Estimation]. URL: <https://dev.to> (in Ukrainian).
9. *Drony Elios pidvyshchuyut' efektyvnist' ohlyadu pokrivel' zaliznychnoyi stantsiyi u Niderlandakh* [Elios Drones Enhance Efficiency for Netherlands Train Station Roof Inspections]. URL: <https://flyability.com> (in Ukrainian).
10. *Zastosuvannya BPLA dlya enerhoaudytu ta obstezhennya budivel'* [Application of UAVs for energy audits and building inspections]. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua> (in Ukrainian).
11. *Posluhy droniv : heodeziya, 3D-modelyuvannya, enerhoaudyt* [Drone services : geodesy, 3D modeling, energy audit]. URL: <https://drones.solar-m.com.ua> (in Ukrainian).
12. *TOBOR X-BOT Xplorer – robot dlya inspektsiyi* [TOBOR X-BOT Xplorer Inspection Crawler Robot]. URL: <https://inspectoroutlet.com> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.04.2025.