DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.73.308-322
УДК: 69.059.1:004.89

Московченко Данило Сергійович,
аспірант кафедри промислового та цивільного будівництва
Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М.Потебні
Запорізького національного університету
ston17123@gmail.com
https://orcid.org/0009-0003-2342-6813
Мішук Катерина Миколаївна,
кандидат технічних наук, доцент
кафедри промислового та цивільного будівництва
Запорізького національного університету
mishukivk@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5480-6032

ЦИФРОВИЙ КОНТРОЛЬ У БУДІВНИЦТВІ З АКЦЕНТОМ НА ІСНУЮЧІ ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРЕВАГИ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ

Анотація: у статті висвітлюється проблема безпеки в будівництві, а також перспективи застосування інноваційних технологій для її покращення. Аналізуються основні причини травматизму, спираючись на статистичні дані з 2003 по 2025 рік, і розглядаються, як сучасні технології можуть допомогти зменшити кількість нещасних випадків. Серед найбільш перспективних рішень у статті акцентується увага на використанні безпілотників, інтернету речей та алгоритмів штучного інтелекту для моніторингу будівельних майданчиків. Також наведено реальні приклади впровадження цифрових технологій у різних країнах. Південна Корея застосовує систему контролю касок, Чилі використовує дрони для виявлення порушень, а UAV-EMOR допомагає швидко оцінювати ризики на будівництві. Попри значні переваги, ці технології мають і свої недоліки, зокрема обмежену автономність дронів, надмірний шум та нестачу навчальних даних для алгоритмів глибокого навчання. У зв'язку з цим пропонуються шляхи вдосконалення, такі як розробка більш точних сенсорів, покращення автономності пристроїв, підготовка фахівців. Зрештою, цифрові інструменти не лише підвищують рівень безпеки, а й змінюють сам підхід до роботи на будівельних майданчиках, роблячи галузь більш технологічною та захищеною для її працівників.

Ключові слова: будівництво; безпека; травматизм; цифровізація; БПЛА; інтернет речей; моніторинг; інноваційні технології; аналіз; дрони; автоматизація; UAV-EMOR.

Постановка проблеми. Будівництво – це сфера підвищеного ризику, де безпека залежить не тільки від суворого дотримання будівельних норм, але й від впровадження інноваційних технологій, які здатні допомогти мінімізувати ризики та небезпеки на будівельних майданчиках.

Не перший рік будівельна індустрія залишається однією з найбільш небезпечних галузей у всьому світі. Незважаючи на позитивну динаміку, яка була помічена в окремих країнах в останні роки, аварійність та смертність на будівельних об'єктах залишається критично важливою проблемою.

Традиційні заходи безпеки, засновані на суворому дотриманні будівельних норм і стандартів, а також на використанні стаціонарних систем контролю безпеки, не дозволяють швидко реагувати на потенційно небезпечні ситуації на будівельних майданчиках, такі як падіння з висоти, травми від падаючих предметів та ряд інших факторів. Цифровізація в сучасних умовах стає необхідним елементом підвищення безпеки в будівництві. Використання інноваційних технологій, таких як безпілотні літальні апарати (БПЛА), інтернет речей (IoT) та алгоритми глибокого навчання, суттєво розширюють можливості збору та аналізу даних, а також забезпечують безперервний контроль будівельних об'єктів, що сприяє підвищенню рівня безпеки та ефективності управління. Разом з тим, застосування безпілотних літальних апаратів у будівельній галузі вимагає вирішення низки технічних та організаційних завдань[1].

Таким чином, актуальною проблемою є вибір та інтеграція інноваційного цифрового рішення, призначеного для ефективного моніторингу та запобігання травмонебезпечним інцидентам на будівельних об'єктах. Дана проблема вимагає вивчення та комплексного підходу до впровадження інноваційних технологій, адаптованих до специфіки будівельних робіт та вимог сучасних стандартів охорони праці.

Аналіз останніх досліджень. Дана стаття спирається на результати сучасних досліджень та статистичні дані. Для виявлення проблеми аналізуються дані: Бюро статистики праці США [2], звіти Міністерства праці Сінгапуру [3], статистика Євростату [4], інформація Європейського агентства з безпеки та гігієни праці (EU-OSHA) [5], дані HSE Великої Британії [6]. В Україні дослідження Бєлікова А.С. та співавт. [7] вказують на порушення інструкцій і недостатній контроль, як основні причини травматизму. Дані Держпраці [8, 9] підтверджують стабільно високий рівень травматизму. Робота Євтушенко Н.С. і Твердохлєбової Н.Є. [10] підкреслює потребу системного аналізу причин травматизму. Сучасні цифрові технології, зокрема безпілотні літальні апарати, мають великий потенціал у підвищенні безпеки. Mohsan S.A.H. та ін. [1] описують можливості дронів у моніторингу будівництва, зниженні людського

фактора та швидкому виявленні ризиків. Liang H. [11], Szóstak M. [12], Calamoneri T. [13], Choi H.-W. [14], а також Seo S. і Liang H. [15] досліджують різні аспекти застосування БПЛА для інспекцій, безпеки й надзвичайних ситуацій. Праця Martinez J.G. [16] і публікація Seo S.-H. та співавт. [17] розглядають інноваційні системи з використанням БПЛА та IoT і смарт-датчиками для ефективного реагування на аварії.

Мета. Провести детальний статистичний аналіз світових даних щодо рівня травматизму в будівництві для виявлення основних тенденцій. У рамках аналізу планується визначити обсяг та масштаб проблеми, виділити найбільш проблемні зони та оцінити відмінності у показниках травматизму в різних регіонах. Проаналізувати інноваційні рішення, пов'язані із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та технологій інтернету речей (IoT) для підвищення безпеки на будмайданчиках. Огляд включає вивчення переваг даних рішень, таких як можливість оперативного моніторингу, збір інформації в реальному часі та скорочення витрат порівняно з традиційними методами контролю, а також аналіз існуючих проблем та обмежень впровадження цих технологій у будівельну галузь. Це комплексне завдання передбачає використання статистичного аналізу та нових методів для всебічного вивчення проблеми травматизму в будівельній галузі. Результатом стане не тільки глибше розуміння причин та поширеності травм, але й розробка рекомендацій щодо впровадження сучасних цифрових рішень у систему охорони праці та забезпечення безпеки на будівництвах.

Основна частина. В основі дослідження лежать статистичні дані про травматизм та смертність у будівельній галузі в світі, взяті з офіційних джерел.

У 2024 році Бюро статистики праці США (BLS) [2] опублікувало звіт про смертельні випадки на виробництві. Одним із лідерів за показниками смертності у 2023 році стала будівельна галузь із показником 9,6 смертей на 100 000 працівників. Історичні дані за 2003–2007 роки свідчать про поступове зниження рівня смертності у будівельній галузі.

У період з 2012 по 2023 рік зберіглася позитивна тенденція, що сприяло зменшенню кількості смертельних випадків у будівельній сфері. Динаміка фатальних випадків в США за 2003 -2023 роки показана на рис. 1.

Рис. 1. Діаграма динаміки рівня смертельних випадків на будівельних об'єктах у США (за даними BLS) [2].

Згідно зі звітом, у 2023 році в будівельному секторі США зареєстровано максимальну кількість смертей на робочому місці – 1075 випадків. При цьому 421 випадок (39,2%) стався через падіння з висоти, спотикання чи послизнення. Із зареєстрованих смертельних подій 64,45% (260 випадків) пов’язані з падіннями з висоти від 6 до 30 футів, тоді як 67 смертельних випадків сталися при падіннях з висоти понад 30 футів. Смертельними стали 22,3% транспортних пригод, 240 фатальних інцидентів. Джерелом 109 смертельних випадків стали переносні будівельні драбини та стрем’янки. У звітах зазначаються й інші види смертельних подій на будівельних об’єктах, включаючи випадки, коли робітники гинули через удари падаючих предметів, ураження електричним струмом, вплив небезпечних речовин та обрушення конструкцій. Крім того, цього ж року під час постійного будівництва було зафіксовано смерті, пов’язані зі спекою, на основних будівельних об’єктах та допоміжних робочих ділянках.

Також, як і в США, будівельна галузь Сінгапуру є одним із основних джерел робочого травматизму. Міністерство праці Сінгапуру у березні 2025 року опублікувало звіт з безпеки та охорони праці за 2024 рік, в якому наведено статистичні дані щодо травматизму в будівельній галузі регіону [3]. Незважаючи на незначне загальне зниження, з 31,9 до 31,0 на 100 000 працівників, ситуація з травматизмом у будівництві Сінгапуру залишається неоднозначною. На невеликих об’єктах, що займаються змінами або реновацією, кількість серйозних травм зменшилася з 111 до 103, проте на великих будівельних майданчиках їх число, навпаки, зросло з 54 до 60. Будівельний сектор Сінгапуру залишився найбільш травматичним у 2024 році – 20 смертельних випадків. Більшість смертей на робочому місці сталися внаслідок нещасних випадків, які мають більш високий ризик летального результату – тип А, рис. 2.

Тип А – защемлення між об’єктами, відмова конструкцій та обладнання, інциденти, пов’язані з кранами, падіння з висоти, пожежі та вибухи,

удушення/утоплення, удари падаючими предметами, удари рухомими об'єктами, інциденти за участю транспортних засобів.

Тип В – менший ризик летального результату: порізи/поранення гострими предметами, викид небезпечних речовин, вплив/контакт з біологічними матеріалами, вплив/контакт з електричним струмом, вплив/контакт з екстремальними температурами, вплив/контакт з небезпечними речовинами, інциденти з обладнанням/механізмами, фізичне насильство, перенапруження/виснажливі рухи, спотикання та падіння, наступ на предмети, удари об предмети.

Table (iv): Number of fatal and major injuries in key sectors by incident risk type (Type A/I 2023-2024

Sector	Incident Risk Type	2023	2024
	Overall	**167**	**166**
Construction	Type A	98	106
	Type B	69	60
	Leading Incident: Type A Falls from Height	37	44

Рис. 2. Кількість смертельних та тяжких травм у будівництві за типом інциденту (тип A/B), 2023-2024 роки [3].

За даними Євростата, у 2022 році будівництво в Європейському Союзі мало один із найвищих рівнів нещасних випадків без летальних наслідків – 2961 випадок на 100 000 працюючих. Майже кожен четвертий смертельний нещасний випадок на виробництві в ЄС у 2022 році трапився у будівельній галузі, на його долю припало 754 смертельних випадки, або 22,9% від загальної кількості фатальних трагедій [4]. За даними Європейського агентства з безпеки та гігієни праці (EU-OSHA), будівельна галузь залишається однією з найбільш травмонебезпечних у ЄС [5].

Незважаючи на покращення, досягнуті за останні роки, будівельна галузь Великої Британії не стала винятком. З 2022 року рівень смертності в будівництві значно зріс. Статистика показала, що у 2023–2024 роках на робочому місці було зафіксовано 51 смерть. Падіння з висоти призвело до смерті у 52% випадків. Защемлення між об'єктами при обрушеннях та удари рухомими предметами стали причиною смерті у 11% випадків кожного з них, рис. 3. Згідно з доповіддю Виконавчого комітету з охорони здоров'я та техніки безпеки Великої Британії (HSE), у 2023–2024 роках будівництво залишається галуззю з особливими ризиками, де особливо важливі заходи щодо підвищення безпеки [6].

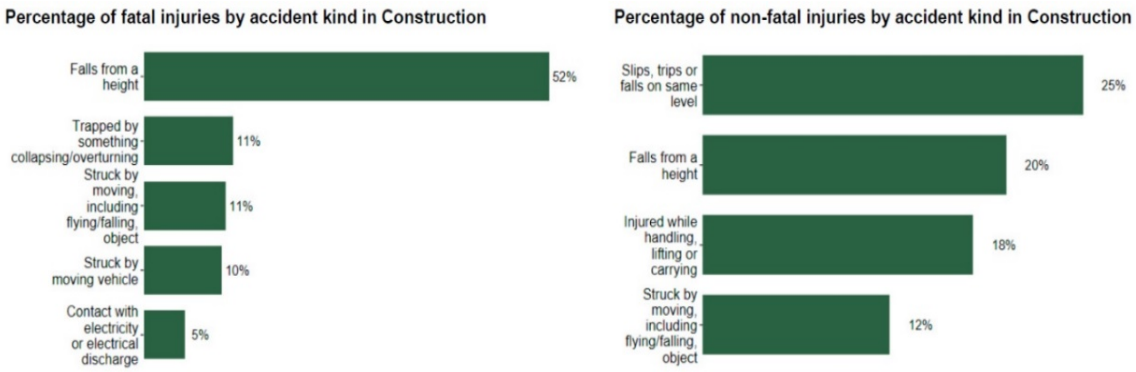

Рис.3. Відсоток смертельних та несмертельних травм за типами нещасних випадків у будівництві[6].

В Україні, як і у всьому світі, будівельна галузь залишається однією з найбільш небезпечних, оскільки щороку фіксуються десятки трагічних випадків [7]. За даними Державної служби з питань праці України за перші дев'ять місяців 2021 року на підприємствах будівельного сектору та виробництва будівельних матеріалів було зареєстровано 164 випадки травматизму, що на 14% перевищує показники за аналогічний період 2020 року. Понад половина смертельних випадків –58% – пов'язані з падінням з висоти, тоді як 33% інцидентів спричинені падінням предметів на співробітників. Організаційні недоліки, що виражаються у відсутності належного контролю, порушення інструкцій та неналежній підготовці співробітників, призвели до 75% усіх випадків летальних наслідків. Незадовільний захист робочих місць та несправне обладнання стали причиною трагедії у 18% випадків. Втома, стрес та інші психофізіологічні фактори стали причиною 7% усіх нещасних випадків [8]. За оперативною інформацією Державної служби з питань праці України, за період з початку 2025 року по травень 2025 року зафіксовано 15 смертельних випадків у будівельній сфері [9]. Відсутність значних змін у динаміці будівельного травматизму на глобальному та національному рівнях свідчить про те, що існуючі підходи до забезпечення безпеки на будівництві або не працюють належним чином, або не впроваджуються в достатній мірі [10]. Інтеграція цифрових технологій у будівельний процес може стати основою для створення безпечних та конкурентоспроможних проєктів в умовах швидкоплинних вимог ринку.

Однією з технологій, що суттєво змінює обличчя сучасного будівництва, є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які часто називають дронами. Сьогодні ці інноваційні пристрої не просто експериментальна новинка, а широко використовуваний інструмент в арсеналі сучасного будівництва [11]. Дрони використовуються не лише для проведення детальної аерозйомки, що дозволяє отримувати високоякісні та детальні зображення об'єктів, але й для постійного

моніторингу будівельних процесів. Дрони підвищують безпеку на будівельних об’єктах, особливо в зонах підвищеного ризику, таких як ділянки з інтенсивним рухом, робочі зони кранів, місця з незакріпленими краями та отворами [12].Використання БПЛА для контролю безпеки на будівельному майданчику забезпечує миттєвий збір інформації про поточний стан процесу будівництва, що дозволяє фіксувати всі зміни та своєчасно виявляти можливі відхилення. Це сприяє оперативному впровадженню коригувань і значно знижує ризик травматизму. Такий підхід суттєво підвищує ефективність управління будівельним процесом, зменшує витрати на проведення традиційних інспекцій і забезпечує високий рівень безпеки на всіх етапах роботи. Дослідження показують, що застосування БПЛА для моніторингу дозволяє не тільки суттєво скоротити часові витрати, що є критично важливим для порятунку життів, а й потенційно знижує витрати завдяки раціональному використанню ресурсів та автоматизації процесів, що сприяє покращенню системи безпеки [13].

Для ефективного збору даних необхідно уважно підходити до вибору БПЛА: його типу, кількості, а також видів та кількості сенсорів. Сьогодні ринок пропонує широкий асортимент дронів, оснащених різноманітними типами датчиків, що дозволяє вирішувати найрізноманітніші завдання. У сфері будівництва найчастіше застосовуються БПЛА з фіксованим крилом, мультироторні дрони та гібридні системи [14].

У 2023 році було опубліковано дослідження, проведене на експериментальному майданчику в місті Тегу, Південна Корея. Команда вчених з кафедри цивільного будівництва Kyungpook National University (Han Liang та Suyoung Seo) використовувала компактний і легкий квадрокоптер DJI Avata для проведення дистанційного зондування. Завдяки мобільності обраного БПЛА вдалося знизити потенційні загрози для працівників, оскільки дрон здійснював інспекцію безпосередньо в зоні їх роботи [15], рис. 4.

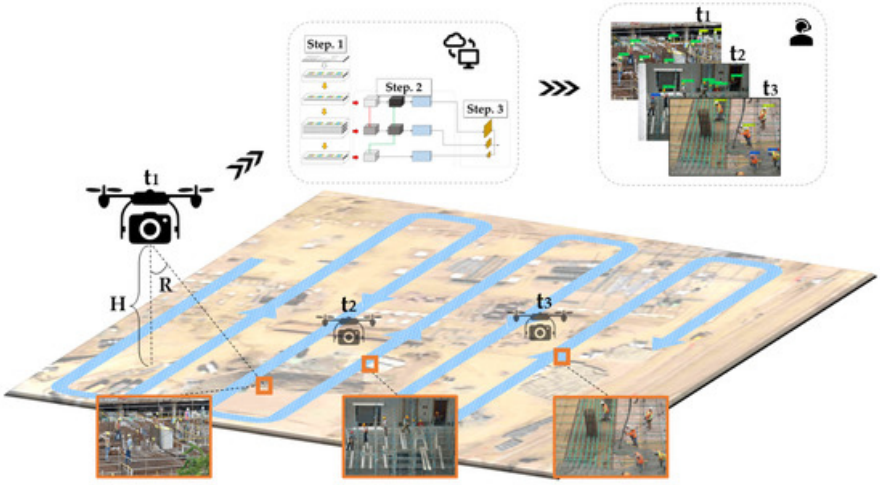

Рис. 4. Блок-схема запропонованої системи патрулювання та інспекції будівельних майданчиків з використанням безпілотних літальних апаратів з малих висот [15].

Основною задачею дослідження було створення автоматизованої системи відстеження, яка спрямована на виявлення порушень заходів безпеки на будівельних майданчиках з метою перевірки дотримання правил носіння захисних касок. Метою дослідження було усунення обмежень традиційних стаціонарних камер, таких як фіксований кут огляду, високі витрати на обладнання та обслуговування. Крім того, ставилась мета підвищення оперативності контролю. Дрон, що летів на висоті 5–15 метрів, здійснював зйомку будівельних ділянок під час активної роботи працівників. Отримані дані негайно відправлялися на сервер, де запускалася обробка за допомогою глибокої нейронної мережі, заснованої на архітектурі Swin Transformer. Такий підхід дозволив дуже точно знаходити та ідентифікувати захисні каски на зображеннях. Дослідження виявило як переваги, так і недоліки використання дронів для моніторингу будівельного майданчика. Переваги та недоліки використання дронів відображено в табл. 1.

Таблиця 1. – Переваги та недоліки використання дронів [15]

Переваги	**Недоліки**
Автоматизація контролю без постійного ручного нагляду.	Зниження точності розпізнавання при збільшенні висоти польоту (що призводить до хибних спрацьовувань).
Швидке виявлення порушень завдяки автоматичній обробці даних за допомогою глибокої нейронної мережі.	Обмежена тривалість роботи дрона (15-30 хвилин), що ускладнює обстеження великих майданчиків.
Висока точність розпізнавання об’єктів (mAP 92,87% та точність для малих об’єктів – 88,7%).	Високий рівень шуму від дрона може відволікати робітників та створювати додаткові незручності.
Гнучкість і мобільність БПЛА, що дозволяє обходити обмеження фіксованих наземних камер (фіксований ракурс, складність встановлення).	Обмеженість навчального набору даних для зйомки з високих точок, що може впливати на якість моделі.

Ще один цікавий приклад використання БПЛА для контролю безпеки був застосований під час будівництва висотної будівлі у столиці Чилі, місті Сантьяго. Ідея дослідження полягала у використанні дронів для отримання

аерофотознімків процесу будівництва з метою виявлення порушень вимог безпеки рис. 5.

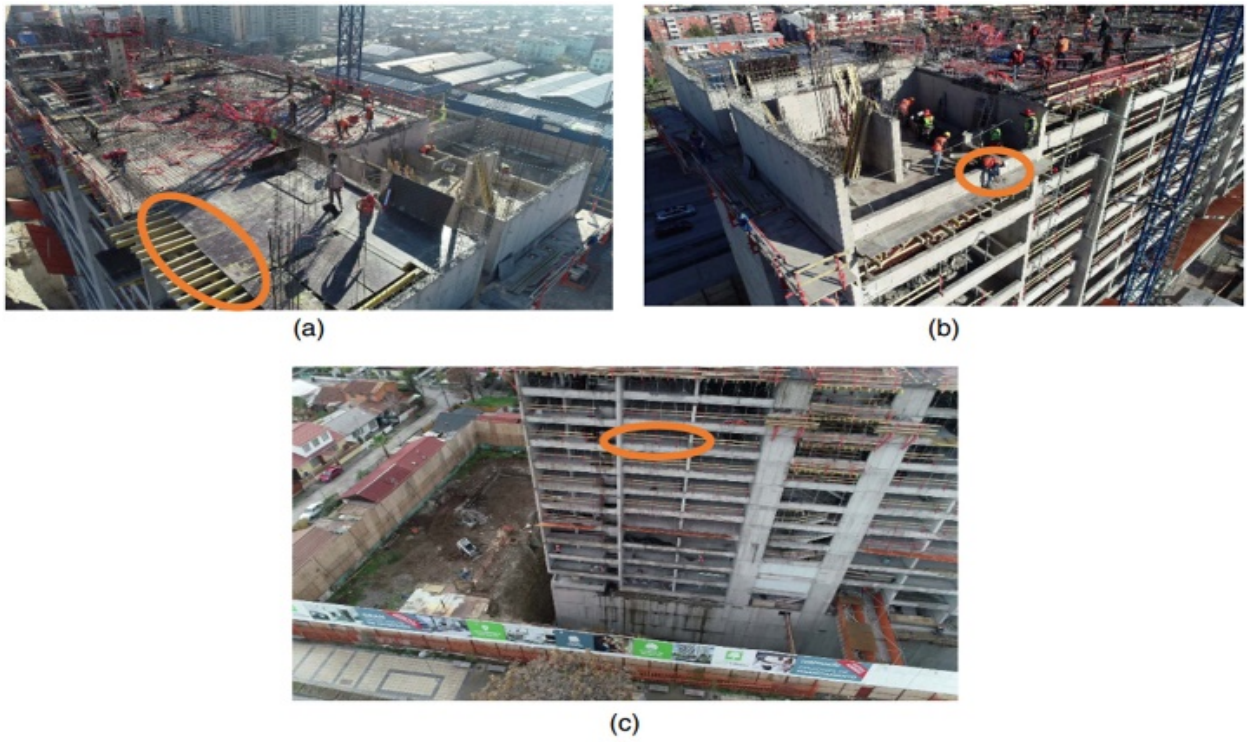

Рис. 5. Знімки з БПЛА для моніторингу безпеки на будівельному майданчику в Чилі: (а) відсутність огорож; (б) працівник без запобіжного поясу; та (с) відсутність огорож [14,16].

За допомогою дрона вдалося отримати широкий огляд будівництва будівлі з висоти. Дрони з камерами високої роздільної здатності здійснювали обліт над будівельним майданчиком, фіксуючи процес будівництва. Були отримані знімки з порушеннями техніки безпеки: відсутність захисних огорож, відсутність запобіжних поясів робітників. Отримані дані порівнювали з актуальними стандартами безпеки, що дозволило оцінити відповідність об’єкта вимогам безпеки та зафіксувати виявлені відхилення [14, 16].

Дослідниками з Південної Кореї була опублікована стаття, присвячена розробці інноваційної системи моніторингу і реагування на надзвичайні ситуації у будівлях з акцентом на виявлення та гасіння пожеж [17]. Під назвою UAV-EMOR (UAV-assisted Emergency Monitoring and Response) представлено систему, яка використовує сучасні технології Інтернету речей (IoT) для поєднання з можливостями БПЛА, розумними датчиками (наприклад, температурними для виявлення аномального перегріву) та Bluetooth-маячками, які інтегровані у смарт-карти або ідентифікаційні пристрої.

Розумні датчики безперервно контролюють зміну температури, наявність диму або інші ознаки загоряння. Дані передаються в режимі реального часу на центральний сервер. При виявленні критичних змін система автоматично

генерує сигнал тривоги та ініціює додаткові перевірки за допомогою БПЛА. Дрони, що діють за заданими маршрутами, швидко переміщуються всередині та зовні будівлі для отримання візуальних підтверджень, фотографій і відео з ділянок, які не охоплюються стаціонарними камерами. Такий підхід дозволяє суттєво розширити зону моніторингу та усунути недоліки видимості у системах відеоспостереження. Особлива увага приділяється відстеженню людей всередині будівлі: Bluetooth-маячки, вбудовані в смарт-карти, постійно передають свій унікальний ідентифікатор та дані про місцезнаходження. Це дає можливість швидко визначити, де знаходяться люди, і, у разі потреби, скоригувати маршрут при можливій евакуації.

Хоча основне застосування розробки орієнтовано на моніторинг функціонуючих будівель, систему UAV-EMOR можна успішно адаптувати для забезпечення безпеки та контролю на будівельних майданчиках. За умов будівництва така система дозволить виявляти ранні ознаки загоряння, координувати оперативне реагування та мінімізувати можливі ризики на об'єкті. Система UAV-EMOR об'єднала в собі передові технології IoT, мобільне спостереження за допомогою БПЛА та точну локалізацію людей. Використання цієї системи під час будівельних робіт може значно покращити контроль, запобігання та оперативне реагування на пожежі та інші надзвичайні ситуації.

Висновки. Статистика травматизму свідчить про те, що традиційні методи безпеки не гарантують оперативного реагування на потенційно небезпечні ситуації. Незважаючи на позитивну динаміку в окремих країнах, дані статистичних джерел вказують на високий ризик травматизму, а іноді й смертельні наслідки. Необхідний кардинальний перегляд стандартних методів і впровадження інноваційних рішень. Застосування цифрових технологій дозволяє автоматизувати будівельний процес та знизити залежність від ручного спостереження та забезпечити збір даних у режимі реального часу. Технології з використанням БПЛА, інтернету речей і алгоритмів глибокого навчання створюють умови для миттєвого виявлення порушень заходів безпеки, що дозволяє своєчасно коригувати процес роботи.

Проте на шляху впровадження інноваційних цифрових систем існують певні обмеження. Наприклад, обмежений час автономної роботи дронів суттєво ускладнює контроль за великими будівельними об’єктами. Зниження точності розпізнавання об’єктів на великих висотах може призводити до пропуску виявлення небезпечних ситуацій. Крім того, високий рівень шуму, що виникає від роботи дронів, може порушувати робочий процес і відволікати робітників, а недостатня кількість навчальних даних стає перешкодою для досягнення максимальної ефективності алгоритмів розпізнавання.

Беручи до уваги виявлені переваги та недоліки, стає очевидною необхідність удосконалення технічних характеристик цифрових систем контролю. Варто застосовувати дрони з підвищеною автономністю та оснащувати їх покращеними датчиками, удосконалювати нейронні мережі для коректного функціонування при різному освітленні та в умовах нечіткого візуального оточення. Спільне використання стаціонарних камер і мобільних пристроїв (БПЛА та IoT-пристроїв) дозволить створити багаторівневу систему контролю, здатну охопити всі небезпечні зони. Важливим зауваженням є підготовка спеціалістів, здатних ефективно працювати з новими технологіями, та адаптація нормативних документів. Незважаючи на існуючі обмеження, інноваційні технології мають потенціал значно підвищити безпеку на будівельних майданчиках та знизити кількість травматичних інцидентів.

Список літератури:

1. Mohsan S.A.H., Khan M.A., Noor F., Ullah I., Alsharif M.H. Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. *Drones*. 2022. T. 6, №6. C. 147. DOI: https://doi.org/10.3390/drones6060147

2. U.S. Bureau of Labor Statistics. *National Census of Fatal Occupational Injuries in 2023*. Washington, D.C.: U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics (BLS), 2024. URL: https://www.bls.gov/news.release/archives/cfoi_12192024.pdf. (дата звернення: 01.04.2025)

3. Ministry of Manpower, Singapore. *Workplace Safety and Health Report 2024: National Statistics*. Singapore: Ministry of Manpower, 2025. URL: https://www.mom.gov.sg/-/media/mom/documents/safety-health/reports-stats/wsh-national-statistics/wsh-national-stats-2024.pdf. (дата звернення: 01.04.2025)

4. Eurostat. *Accidents at work - statistics by economic activity*. Luxembourg, 2024. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_by_economic_activity(дата звернення: 01.04.2025)

5. European Agency for Safety and Health at Work, Lothar L. *Occupational safety and health in Europe: state and trends 2023*. LU: Publications Office, 2023. URL: https://data.europa.eu/doi/10.2802/56459. (дата звернення: 01.04.2025)

6. Health and Safety Executive (HSE). *Construction statistics in Great Britain, 2024*. Great Britain: Health and Safety Executive (HSE), 2024. URL: https://www.hse.gov.uk/statistics/assets/docs/construction.pdf. (дата звернення: 01.04.2025)

7. Бєліков А. С., Тодоров О. П., Шиба О. В., Журбенко В. М. Аналіз травматизму та загибелі людей через порушення вимог безпеки в Україні.

Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 5. С. 55–64. DOI: https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.55.993.

8. Державна служба України з питань праці. *Інформація про стан виробничого травматизму за 9 місяців 2021 року у галузі будівництва та промисловості будматеріалів*. Київ: Держпраці, 2021. URL: https://dsp.gov.ua/causes-accidents/informatsiia-za-i-pivrichchia-2021-roku/#.(дата звернення: 01.05.2025)

9. Державна служба України з питань праці. *Оперативна інформація*. Київ: Держпраці, 2025, URL: https://dsp.gov.ua/operatyvna-informatsiia/.(дата звернення: 01.05.2025)

10. Євтушенко Н. С., Твердохлєбова Н. Є. Необхідність аналізу причин будівельного травматизму у сфері безпеки праці. *ISCIENCE.IN.UA «Actual Scientific Research in the Modern World»*. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/12ff3e5d-f22d-4f80-8a6a-cb96f8a60660/content.

11. Liang H., Lee S.-C., Bae W., Kim J., Seo S. Towards UAVs in Construction: Advancements, Challenges, and Future Directions for Monitoring and Inspection. *Drones*. 2023. Т. 7, №.3. С. 202. DOI: https://doi.org/10.3390/drones7030202.

12. Szóstak M., Nowobilski T., Mahamadu A.-M., Pérez D.C. Unmanned aerial vehicles in the construction industry – Towards a protocol for safe preparation and flight of drones. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*. 2023. Т. 11, №.2. С. 296–316. DOI: https://doi.org/10.1108/IJIUS-05-2022-0063.

13. Calamoneri T., Coro F., Mancini S. A Realistic Model to Support Rescue Operations After an Earthquake via UAVs. *IEEE Access*. 2022. Т. 10. С. 6109–6125. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141216.

14. Choi H.-W., Kim H.-J., Kim S.-K., Na W.S. An Overview of Drone Applications in the Construction Industry. *Drones*. 2023. Т. 7, №8. С. 515. DOI: https://doi.org/10.3390/drones7080515.

15. Liang H., Seo S. UAV Low-Altitude Remote Sensing Inspection System Using a Small Target Detection Network for Helmet Wear Detection. *Remote Sensing*. 2022. Т. 15, №1. С. 196. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15010196.

16. Martinez J.G., Gheisari M., Alarcón L.F. UAV Integration in Current Construction Safety Planning and Monitoring Processes: Case Study of a High-Rise Building Construction Project in Chile. *Journal of Management in Engineering*. 2020. Т. 36, №3. С. 05020005. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000761.

17. Seo S.-H., Choi J.-I., Song J. Secure Utilization of Beacons and UAVs in Emergency Response Systems for Building Fire Hazard. *Sensors*. 2017. Т. 17, №10. С. 2200. DOI: https://doi.org/10.3390/s17102200.

References

1. Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones, 6*(6), 147. https://doi.org/10.3390/drones6060147 (in English).

2. U.S. Bureau of Labor Statistics. (2024). *National census of fatal occupational injuries in 2023*. U.S. Department of Labor. https://www.bls.gov/news.release/archives/cfoi_12192024.pdf (last accessed: 01.04.2025). (in English).

3. Ministry of Manpower, Singapore. (2025). *Workplace safety and health report 2024: National statistics*. https://www.mom.gov.sg/-/media/mom/documents/safety-health/reports-stats/wsh-national-statistics/wsh-national-stats-2024.pdf(last accessed: 01.04.2025). (in English).

4. Eurostat. (2024). *Accidents at work – Statistics by economic activity*. https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Accidents_at_work_-_statistics_by_economic_activity (last accessed: 01.04.2025) .(in English).

5. Lothar, L. (2023). *Occupational safety and health in Europe: State and trends 2023*. European Agency for Safety and Health at Work. https://data.europa.eu/doi/10.2802/56459(last accessed: 01.04.2025). (in English).

6. Health and Safety Executive. (2024). *Construction statistics in Great Britain, 2024*. https://www.hse.gov.uk/statistics/assets/docs/construction.pdf (in English).

7. Bielikov, A. S., Todorov, O. P., Shyba, O. V., & Zhurbenko, V. M. (2023). Analysis of injuries and fatalities due to safety violations in Ukraine. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, (5), 55–64. https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.241023.55.993 (in Ukrainian).

8. State Labour Service of Ukraine. (2021). *Information on the state of industrial injuries in the construction and building materials industry for 9 months of 2021*. https://dsp.gov.ua/causes-accidents/informatsiia-za-i-pivrichchia-2021-roku/# (last accessed: 01.05.2025). (in Ukrainian).

9. State Labour Service of Ukraine. (2025). *Operational information*. https://dsp.gov.ua/operatyvna-informatsiia/(last accessed: 01.05.2025) (in Ukrainian).

10. Yevtushenko, N. S., & Tverdokhlebova, N. Ye. (n.d.). The necessity of analyzing the causes of construction injuries in the field of occupational safety. *ISCIENCE.IN.UA «Actual Scientific Research in the Modern World»*. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/12ff3e5d-f22d-4f80-8a6a-cb96f8a60660/content (in Ukrainian).

11. Liang, H., Lee, S.-C., Bae, W., Kim, J., & Seo, S. (2023). Towards UAVs in construction: Advancements, challenges, and future directions for monitoring and inspection. *Drones, 7*(3), 202. https://doi.org/10.3390/drones7030202 (in English).

12. Szóstak, M., Nowobilski, T., Mahamadu, A.-M., & Pérez, D. C. (2023). Unmanned aerial vehicles in the construction industry – Towards a protocol for safe preparation and flight of drones. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 11*(2), 296–316. https://doi.org/10.1108/IJIUS-05-2022-0063 (in English).

13. Calamoneri, T., Coro, F., & Mancini, S. (2022). A realistic model to support rescue operations after an earthquake via UAVs. *IEEE Access, 10*, 6109–6125. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141216 (in English).

14. Choi, H.-W., Kim, H.-J., Kim, S.-K., & Na, W. S. (2023). An overview of drone applications in the construction industry. *Drones, 7*(8), 515. https://doi.org/10.3390/drones7080515 (in English).

15. Liang, H., & Seo, S. (2022). UAV low-altitude remote sensing inspection system using a small target detection network for helmet wear detection. *Remote Sensing, 15*(1), 196. https://doi.org/10.3390/rs15010196 (in English).

16.Martinez, J. G., Gheisari, M., & Alarcón, L. F. (2020). UAV integration in current construction safety planning and monitoring processes: Case study of a high-rise building construction project in Chile. *Journal of Management in Engineering, 36*(3), 05020005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000761 (in English).

17.Seo, S.-H., Choi, J.-I., & Song, J. (2017). Secure utilization of beacons and UAVs in emergency response systems for building fire hazard. *Sensors, 17*(10), 2200. https://doi.org/10.3390/s17102200 (in English).

Abstract

Danylo Moskovchenko, PhD student, Engineering educational and scientific, Institute named after Y.M. Potebnya of Zaporizhzhia National University.

Kateryna Mishuk, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University.

Digital control in construction with an emphasis on existing problems and the advantages of innovative approaches

Construction remains one of the most hazardous industries globally. High mortality rates at construction sites, primarily due to falls from height, strikes by falling objects, and other injuries, underscore the need to revise traditional safety approaches. This article is dedicated to identifying and analyzing safety issues in construction and the potential of implementing innovative technologies to address them. The primary focus is on the application of unmanned aerial vehicles (UAVs), the Internet of Things (IoT), and deep learning algorithms for monitoring and preventing injuries. Based on statistical data from the U.S. Bureau of Labor Statistics, Eurostat, Singapore's Ministry of Manpower, the UK's HSE, Ukraine's State Labor Service, and other sources, an analysis of injury trends from 2003 to 2025 was conducted, identifying the main causes of injuries in construction. The article provides examples of innovative technology

implementation. For instance, in Daegu (South Korea), a DJI Avata UAV combined with a Swin Transformer neural network was used to monitor compliance with safety helmet regulations, while in Santiago (Chile), drones detected safety violations at multi-story construction sites. Additionally, the UAV-EMOR system, integrating UAVs, IoT, and Bluetooth beacons, is described for monitoring hazardous situations, including fires. The advantages of digital solutions include real-time data collection, automated monitoring, and cost reduction; however, limitations such as limited drone autonomy, noise, and a lack of training data require further improvements. The article proposes recommendations for enhancing technologies, including the use of drones with increased autonomy, improved sensors, and multi-level control systems. The importance of training specialists and adapting regulatory frameworks for the effective implementation of innovative solutions to minimize risks and enhance safety in construction is emphasized.

Keywords: construction; safety; injury rate; digitalization; UAVs; Internet of Things; monitoring; innovative technologies; analysis; drones; automation; UAV-EMOR.