

УДК 614.84:004.94:681.5:629.735

*В. І. Томенко¹, к.т.н., доцент, докторант (ORCID 0000-0001-7139-9141)**А. І. Ковальов¹, д.т.н., с.н.с., нач. відділу (ORCID 0000-0002-6525-7558)**Р. П. Мельник¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-5622-5642)**О. Г. Мельник¹, к.т.н., с.н.с., доц. каф. (ORCID 0000-0002-9671-108X)**М. Г. Томенко², к.пед.н., доцент, судовий експерт (ORCID 0000-0002-2354-9106)*¹*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*²*Київський науково-дослідний інститут судових експертиз, Черкаси, Україна*

РОЗРОБКА БПЛА-КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ПОШКОДЖЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Обґрунтовано концепцію створення модульного безпілотного авіаційного комплексу для дистанційного обстеження пошкоджених будівель і споруд у зоні надзвичайної ситуації. Запропоновано розглядати безпілотний літальний апарат не лише як засіб відеорозвідки, а як мобільну платформу неруйнівного контролю, просторового моделювання, газового моніторингу, тепловізійного аналізу та оцінювання небезпеки обвалення конструктивних елементів. Обґрунтовано, що ефективність такого комплексу визначається не окремим сенсором, а узгодженою роботою бортових, наземних і носимих модулів, які забезпечують збір, передавання, оброблення та візуалізацію діагностичної інформації. До складу комплексу включено безпілотний літальний апарат зі статичною сегментованою захисною оболонкою, лазерний сканер для побудови тривимірної моделі, кольорову відеокамеру, тепловізійний модуль, газоаналізатор із винесеним газозабірником, модуль ближньої навігації та стабілізації висоти, бортовий обчислювально-навігаційний модуль, віброакустичний модуль моніторингу технічного стану конструкцій, світлодіодне підсвічування, наземний ретранслятор зв'язку та шолом рятувальника з навігаційним модулем. Запропоновано інтегральний індекс небезпеки конструктивної зони, який враховує геометричні деформації, візуальні пошкодження, теплові аномалії, віброакустичну активність і газову небезпеку. Результатом застосування комплексу є формування тривимірної моделі пошкодженого об'єкта, газової карти, карти небезпек і безпечного маршруту руху рятувальника. Практична цінність запропонованого підходу полягає у скороченні часу первинної розвідки, зменшенні ризику для особового складу, підвищенні обґрунтованості рішень керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та створенні інформаційної основи для планування послідовності розбору завалів. Такий підхід підвищує оперативність і безпеку рятувальних дій.

Ключові слова: пошкодження, тепловізійна діагностика, карта небезпек, інтегральний індекс небезпеки, маршрут рятувальника

1. Вступ

Під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, пов'язаних із руйнуванням або пошкодженням будівель і споруд, одним із найскладніших завдань є швидке визначення технічного стану конструкцій до входу рятувальників у небезпечну зону. Особливої актуальності ця проблема набуває після вибухів, пожеж, руйнування несучих елементів, ураження об'єктів критичної інфраструктури, часткового обвалення несучих будівельних конструкцій, утворення завалів, появи тріщин, локальних деформацій та ймовірності вторинного обвалення будівель та споруд.

Традиційна первинна розвідка здебільшого базується на візуальному огляді, досвіді керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та ручному застосуванні окремих вимірювальних приладів. Такий підхід має суттєві обмеження, оскільки доступ до пошкоджених будівельних конструкцій часто є небезпечним або неможливим. Крім того, візуальні ознаки не завжди дозволяють виявити приховані дефекти, локальне перегрівання матеріалів, розвиток мікротріщин, небезпечні концентрації газів або зміну динамічної жорсткості конструктивного елемента.

У цих умовах перспективним є застосування модульних БПЛА-комплексів, здатних одночасно виконувати відеорозвідку, 3D-сканування, тепловізійний контроль, газоаналіз і віброакустичний моніторинг. Принципово важливо, щоб результатом такого обстеження була не сукупність окремих зображень або вимірювань, а інтегрована карта небезпек, побудована із застосуванням комп'ютерної графіки, що дозволить оперативно приймати рішення щодо маршруту слідування рятувальників, зон забороненого доступу та послідовності розбору завалів.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення безпеки особового складу під час пошуково-рятувальних робіт шляхом створення модульного безпілотного авіаційного комплексу, здатного дистанційно оцінювати стан пошкоджених конструкцій, виявляти приховані небезпеки та формувати інформаційну основу для прийняття оперативних тактичних рішень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Застосування безпілотних авіаційних систем у фотограмметрії, дистанційному зондуванні та 3D-картографуванні розглянуто в [1, 2]. У зазначених роботах авторами узагальнено можливості використання безпілотних літальних апаратів як ефективного джерела просторових даних для інспектування, моніторингу, картографування та побудови тривимірних моделей об'єктів, особливо у важкодоступних або небезпечних зонах. Показано, що такі системи дають змогу оперативно отримувати фотограмметричні дані, формувати цифрові моделі місцевості та об'єктів, а також підвищувати інформативність дистанційного огляду. Але у наведених дослідженнях основну увагу приділено переважно просторовому моделюванню та картографуванню, тоді як питання оцінювання технічного стану пошкоджених конструкцій у реальному часі, виявлення небезпечних зон для рятувальників і формування тактичного маршруту руху особового складу залишаються недостатньо розкритими. При цьому, можливість використання тривимірного сканування не як самостійної кінцевої операції, а як базового інформаційного шару для побудови карти небезпек пошкодженого об'єкта авторами не розглядалась.

Візуальний моніторинг об'єктів цивільної інфраструктури за допомогою безпілотних літальних апаратів з камерою проаналізовано у [3]. Автори підкреслюють, що такі платформи дозволяють збирати зображення з інформативних ракурсів, документувати стан об'єкта та використовувати отримані дані разом із інформаційними моделями будівель. Для виявлення тріщин у бетонних конструкціях у [4] запропоновано підходи на основі зображень, отриманих з безпілотного літального апарата, та методів цифрової обробки. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з поєднанням візуальної інформації з іншими діагностичними ознаками, необхідними для оцінювання прихованих дефектів, газової небезпеки, температурних аномалій та ознак активного руйнування конструктивних елементів.

Тепловізійний модуль, встановлений на безпілотному літальному апараті, застосовується для дистанційної фіксації температурних неоднорідностей на поверхні пошкоджених конструкцій, які можуть свідчити про приховані дефекти, зокрема розшарування бетону, відшарування захисного шару, наявність порожнин або зон термічної деградації матеріалу. У [5] авторами доведено практичність застосування безпілотної інфрачервоної термографії для неруйнівного контролю стану залізобетонних конструкцій. Для контролю небезпечних газів важливими є результати огляду [6], де систематизовано можливості малих дронів для просторових вимірювань хімічних параметрів повітря. Але залишилися невирішеними

питання, пов'язані з інтеграцією тепловізійних і газоаналітичних даних у єдину картографічну модель небезпеки, а також з урахуванням впливу потоків від гвинтів безпілотного літального апарата на достовірність відбору проб повітря.

Теоретичною основою віброакустичного моніторингу є концепція моніторингу технічного стану конструкцій, у межах якої пошкодження розглядається як зміна матеріальних або геометричних властивостей системи, що погіршує її поточну або майбутню працездатність [7, 8]. У цих роботах авторами узагальнено фундаментальні підходи до виявлення пошкоджень за змінами динамічних характеристик, акустичних імпульсів, вібраційних параметрів та інших ознак деградації конструкцій. Для роботи безпілотного літального апарата у приміщеннях без глобальної навігаційної супутникової системи критично важливими є методи одночасної локалізації та побудови карти, що узагальнені в [9]. Але авторами не розглядалися питання, пов'язані з адаптацією таких підходів до мобільної платформи, яка має працювати в пошкоджених будівлях без попереднього встановлення стаціонарних сенсорів і без входу рятувальників у небезпечну зону.

Питання стійкої передачі даних від безпілотного літального апарата, особливо в умовах перешкод і обмеженої видимості, розглянуто в [10], де висвітлено архітектуру та виклики бездротових комунікацій із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Перспектива переходу від окремих сенсорних даних до цифрового представлення об'єкта узгоджується з напрямом створення цифрових двійників будівельних об'єктів [11]. У цих роботах авторами показано, що ефективна передача даних і цифрове подання об'єкта є важливими умовами для подальшої аналітичної обробки, моделювання та підтримки управлінських рішень. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з перетворенням отриманих цифрових даних у практичні рішення щодо зон небезпеки, допустимості перебування особового складу та вибору безпечного маршруту рятувальника.

Також можливий варіант застосування безпілотних авіаційних комплексів із використанням оптичного волокна. У [12] розглянуто технічні особливості роботи дронів на оптоволоконному каналі зв'язку, їхні переваги в умовах потужних радіоперешкод, бетонних споруд, тунелів, укриттів та інших середовищ, де радіоканал може бути нестабільним або вразливим. Показано, що такі апарати можуть забезпечувати високу стабільність і прогнозованість передавання сигналу, хоча зазвичай мають обмеження за маневреністю, дальністю, масою котушки та складністю практичного застосування. Але осталися поза увагою питання, пов'язані з поєднанням стійкого каналу зв'язку з багатосенсорним обстеженням, оцінюванням технічного стану конструкцій, газовим контролем, тепловізійною діагностикою та формуванням карти небезпек.

Попри значну кількість досліджень, невирішеною залишається задача поєднання сканування за допомогою безпілотного літального апарата, газового контролю, тепловізійної діагностики, візуального аналізу тріщин, віброакустичного моніторингу та стійкого передавання даних в єдину систему, орієнтовану саме на пошуково-рятувальні роботи в пошкоджених будівлях. Відомі підходи здебільшого розв'язують окремі задачі: побудову тривимірної моделі, відеоогляд, тепловізійний контроль, вимірювання газів, моніторинг технічного стану або навігацію без супутникового сигналу. Але для умов ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій необхідним є не окремий набір сенсорних даних, а інтегрований апаратно-програмний комплекс, який забезпечує формування тривимірної моделі пошкодженого об'єкта, газової карти, теплової карти, карти небезпек, інтегрального індексу небезпеки конструктивної зони та безпечного маршруту рятувальника.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробленню модульного безпілотного авіаційного комплексу для дистанційного обстеження пошкоджених об'єктів, інтеграції багатосенсорних даних та формування інформаційної основи для прийняття рішень під час пошуково-рятувальних робіт.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розроблення модульного БПЛА-комплексу для дистанційного обстеження пошкоджених об'єктів, обґрунтування його структури та принципів функціонування, формування тривимірної моделі, газової карти, карти небезпек і прогнозування поведінки будівельних конструкцій, що можуть обвалитися під час пошуково-рятувальних робіт.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- 1) розробити структуру, склад і конструктивну інтеграцію модульного БПЛА-комплексу;
- 2) розробити підхід до інтеграції даних у єдиний індекс небезпеки конструктивної зони;
- 3) розробити методику експериментального застосування та оцінювання ефективності БПЛА-комплексу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес дистанційного обстеження пошкоджених будівель, споруд та об'єктів критичної інфраструктури під час пошуково-рятувальних робіт у зоні надзвичайної ситуації.

Предметом дослідження є інженерно-технічні рішення, методи багатосенсорного збору та інтеграції даних, а також моделі оцінювання небезпеки конструктивних зон із застосуванням модульного БПЛА-комплексу зі статичною захисною оболонкою, LiDAR/3D-сканером, тепловізійним, газоаналітичним і віброакустичним модулями.

Методичну основу дослідження становлять системний аналіз типових технічних рішень, концептуальне проектування БПЛА-комплексу, структурно-функціональне моделювання, порівняльний аналіз варіантів базових платформ та формалізація критеріїв оцінки небезпеки конструктивних зон. Як базовий варіант для внутрішнього обстеження розглянуто квадрокоптер 3–5 дюймів типу *cinewhoop* або 5-дюймовий безпілотний літальний апарат (далі – БПЛА) у статичній сегментованій захисній клітці. Вибір такої архітектури обумовлений вимогами польоту у тісних просторах, без глобальної навігаційної супутникової системи, за наявності пилу, уламків, арматури, кабелів і ймовірних контактів із перешкодами. Для вузьких проходів доцільною є компактна платформа 3–4" з жорсткими каналами навколо гвинтів і додатковими дугами зверху та знизу. Для агресивніших контактів і збільшеного сенсорного навантаження доцільним є 5" БПЛА у сферичній або сферо-циліндричній клітці. Для зовнішнього обстеження фасадів, дахів і великих промислових об'єктів можуть застосовуватися промислові платформи з більшою вантажопідйомністю. Однак, для внутрішнього обстеження завалів найбільш доцільною є компактна спеціалізована *indoor*-платформа зі статичною оболонкою та навігацією на основі *Optical Flow*, *ToF*, *VIO/SLAM* та інерціальних сенсорів.

На рис. 1 відображено принципову відмінність запропонованого рішення від

звичайного відео-БПЛА. При цьому, дрон розглядається як центральний мобільний вузол багатосенсорної системи, а не як окремий носій камери. Також показано поєднання трьох блоків: бортового блоку збору даних, наземного блоку ретрансляції та обробки інформації, а також блоку підтримки рятувальника через навігаційний шолом.

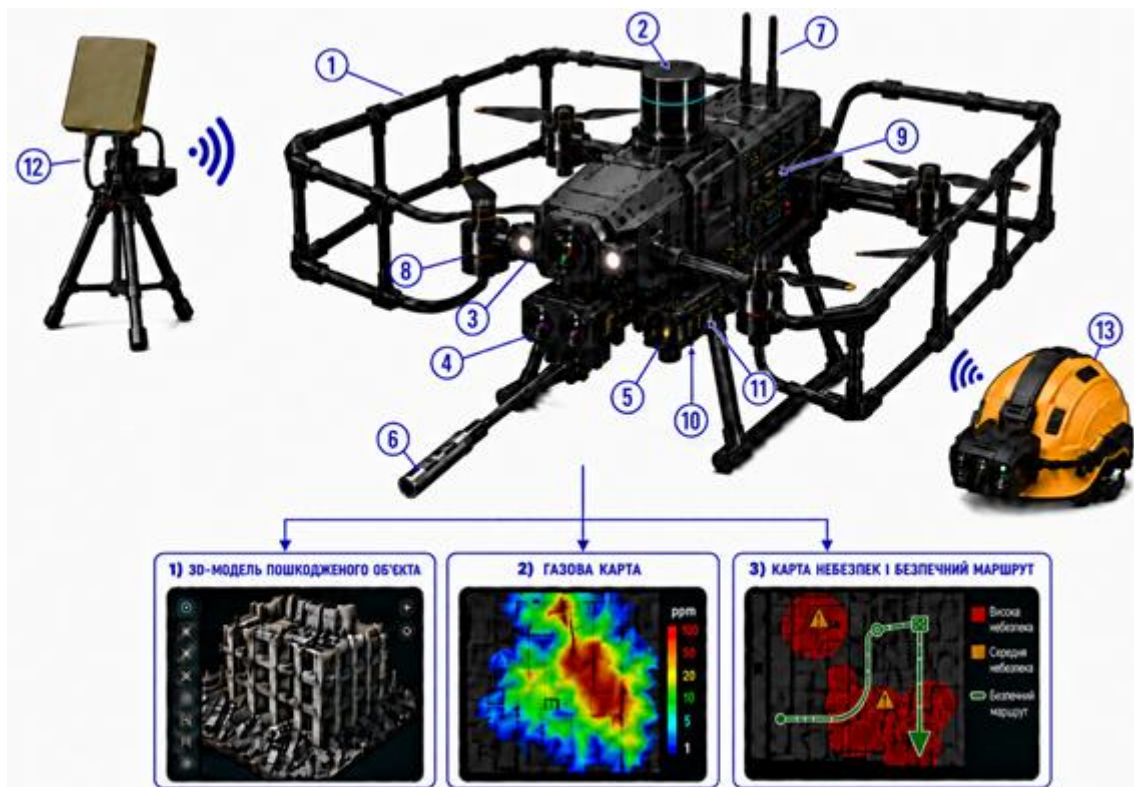


Рис. 1. Концептуальна схема удосконаленого модульного БПЛА-комплексу для обстеження пошкоджених об'єктів: 1 – захисна каркасна оболонка; 2 – LiDAR / 3D-сканер; 3 – RGB/FPV-камера; 4 – тепловізійний модуль; 5 – газоаналітичний модуль; 6 – винесений газозабірник (проба відбору повітря); 7 – антени зв'язку; 8 – світлодіодне підсвічування (LED); 9 – акумуляторна батарея, автопілот і бортовий обчислювач; 10 – модуль ближньої навігації та стабілізації висоти; 11 – віброакустичний модуль моніторингу технічного стану конструкцій; 12 – наземний ретранслятор зв'язку; 13 – шолом рятувальника з навігаційним модулем

Така побудова дає змогу перейти від простого огляду пошкодженої зони до формування 3D-моделі, газової карти, карти небезпек і безпечного маршруту руху особового складу.

5. Розробка структури, складу і конструктивна інтеграція модульного БПЛА-комплексу

Запропонований комплекс розглядається як інтегрована апаратно-програмна система, призначена для дистанційного обстеження пошкоджених об'єктів до входу рятувальників у небезпечну зону. Його структура охоплює бортові модулі збору діагностичних даних, наземний ретранслятор зв'язку, станцію обробки інформації та шолом рятувальника з навігаційним модулем. Узагальнену структуру комплексу наведено на рис. 1, а склад основних модулів та їх функціональне призначення систематизовано у табл. 1.

Наземно-носима інфраструктура забезпечує передавання, приймання та практичне використання діагностичної інформації. Ретранслятор підвищує стійкість відеоканалу, телеметрії і передачі картографічних даних, а шолом рятувальника забезпечує отримання маршруту, попереджень про газову небезпеку та сигналів щодо зон можливого обвалення.

Табл. 1. Склад і призначення модулів БПЛА-комплексу

№	Модуль	Функціональне призначення
1	Захисна сегментована каркасна оболонка	Захист гвинтів, корпусу й сенсорів при контакті з уламками, стінами, арматурою та кабелями
2	LiDAR / 3D-сканер	Побудова хмари точок, визначення геометрії завалу, прогинів, перекосів і проходів
3	RGB / FPV-камера	Візуальне обстеження тріщин, сколів, оголеної арматури й деформацій
4	Тепловізійний модуль	Виявлення постраждалих, осередків тління, перегрітих ділянок і прихованих дефектів
5	Газоаналітичний модуль	Контроль CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ S, VOC, O ₂ та інших небезпечних речовин
6	Винесений газозабірник 200–400 мм	Відбір проб поза основним потоком гвинтів для підвищення достовірності вимірювань
7	Анени зв'язку diversity	Підвищення стійкості каналу в умовах залізобетонного екранування та багатопроменевого поширення
8	Світлодіодне підсвічування	Робота в темряві, диму та пилу без втрати якості відео
9	Акумуляторна батарея, автопілот, бортовий обчислювально-навігаційний модуль	Живлення, стабілізація польоту, локальна обробка даних і навігація без GNSS
10	Модуль ближньої навігації та стабілізації висоти	Стабілізація висоти та положення у приміщеннях
11	Віброакустичний модуль моніторингу технічного стану конструкцій	Виявлення мікроруйнувань, тріщин, локальних вібрацій і ознак активної деградації
12	Наземний ретранслятор зв'язку	Передача відеоданих, телеметрії, хмари точок, газової карти, карти небезпек і маршруту
13	Шолом рятувальника з навігаційним модулем	Отримання маршруту, попереджень про небезпеку та інформаційна підтримка рятувальника

Дані табл. 1 свідчать, що запропонований комплекс побудовано за принципом функціонального розподілу завдань між окремими модулями. Захисна сегментована оболонка забезпечує механічну живучість БПЛА у тісному просторі, LiDAR/3D-сканер формує геометричну основу цифрової моделі, RGB/FPV-камера забезпечує візуальну ідентифікацію дефектів, а тепловізійний та газоаналітичний модулі відповідають за виявлення прихованих небезпек. Окреме значення має винесений газозабірник, оскільки його розміщення поза основним потоком гвинтів підвищує достовірність контролю газового середовища в повітрі.

Отже, результати, наведені в табл. 1, підтверджують, що система має не лінійну, а багаторівневу структуру: перший рівень забезпечує безпечний політ і орієнтування, другий рівень – збір діагностичних даних, третій – передачу й обробку інформації, четвертий – формування практичного рішення для рятувальників. Саме така комбінація модулів дозволяє розглядати БПЛА-комплекс як засіб неруйнівного контролю та підтримки прийняття рішень, а не лише як засіб дистанційного спостереження.

Принцип роботи комплексу передбачає послідовне розгортання ретранслятора, запуск БПЛА з безпечної точки, первинний огляд, LiDAR-сканування, тепловізійний і газовий контроль, фіксацію віброакустичних ознак пошкодження, інтеграцію отриманих даних і формування карти небезпек. Така карта має відображати не лише геометрію завалу, а й рівень ризику для кожної конструктивної зони.

Особливе значення має газоаналізатор із винесеним газозабірником. Якщо сенсор розміщено безпосередньо біля корпусу, потік від пропелерів може розбавляти локальну газову хмару або зміщувати її від сенсора. Тому газозабірник доцільно виносити вперед і нижче площини гвинтів на 200–400 мм, а сам газоаналітичний блок розміщувати ближче до центра мас БПЛА.

Для прогнозування поведінки будівельних конструкцій, що можуть обвалитися у короткий проміжок часу, доцільно поєднувати геометричні, візуальні, теплові, віброакустичні та газові ознаки. Якщо LiDAR виявляє перекис або прогин, камера фіксує тріщини й оголену арматуру, тепловізор показує аномальну температуру, а модуль моніторингу технічного стану конструкцій реєструє активні акустичні імпульси, то така зона має класифікуватися як критично небезпечна.

Модульність запропонованого комплексу повинна забезпечуватися не лише переліком сенсорів, а й уніфікованою конструктивною та інформаційною архітектурою. Для цього доцільно передбачити механічний інтерфейс модулів у вигляді єдиної монтажної шини або декількох стандартизованих посадкових вузлів із фіксованими точками кріплення, які дозволяють встановлювати LiDAR-сканер, тепловізійний модуль, газоаналітичний блок, модуль ближньої навігації, світлодіодне підсвічування та віброакустичний модуль без зміни базової рами БПЛА.

Для скорочення часу підготовки до роботи в польових умовах кріплення навісного обладнання має бути швидкознімним, із механічною фіксацією від самовільного роз'єднання під час вібрацій і контакту з перешкодами. Електроживлення модулів доцільно виконувати через захищену бортову шину живлення з окремими стабілізованими лініями для сенсорів, обчислювального модуля та підсвічування. Передавання даних між модулями, бортовим обчислювально-навігаційним модулем і наземною станцією може здійснюватися через уніфіковані цифрові інтерфейси та протокол обміну телеметрією, відеоданими, результатами газового контролю, хмарою точок і службовою інформацією про стан модулів.

Конструкція БПЛА має враховувати пилозахист, вологостійкість і термостійкість, оскільки у пошкоджених будівлях після пожежі або вибуху наявні пил, волога, сажа, дрібні уламки та локально нагріті поверхні. Тому критичні електронні блоки доцільно розміщувати у частково герметизованих корпусах із пиловими фільтрами, захисними ущільненнями, конформним покриттям друкованих плат і тепловідведенням від регуляторів та обчислювальних модулів. Для LiDAR, тепловізора, камер і газозабірника необхідно передбачити окремі захисні козирки, змінні прозорі або інфрачервоно-прозорі екрани, демпфувальні кронштейни та обмежувачі ходу, які зменшують ризик пошкодження сенсорів при ударі.

Після встановлення або заміни модуля у польових умовах необхідно контролювати балансування БПЛА, положення центра мас і допустимість вібрацій. Для цього кожний змінний модуль повинен мати паспорт маси, рекомендоване місце встановлення та допустимий діапазон зміщення центра мас. У випадку заміни модуля оператор повинен виконати коротку перевірку механічної фіксації, електроживлення, зв'язку, калібрування сенсора та пробного зависання на безпечній висоті.

6. Розробка підходу до інтеграції даних у єдиний індекс небезпеки конструктивної зони

Для обґрунтування відмінностей запропонованого БПЛА-комплексу виконано порівняння з типовими технічними рішеннями, що застосовуються для дистанційного огляду, 3D-моделювання, тепловізійного або газового контролю та структурного моніторингу. Результати такого порівняння наведено в табл. 2.

Табл. 2. Порівняння типових розробок і запропонованого БПЛА-комплексу

Критерій	Відео-БПЛА	БПЛА 3D/фотограмметрії	Тепловізійний/газовий БПЛА	SHM/роботизований контроль	Запропонований комплекс
Основне призначення	Візуальна розвідка	Побудова 3D-моделі	Пошук теплових/газових аномалій	Контроль технічного стану	Єдина система обстеження, НК, прогнозу небезпеки і маршруту
Оцінка конструктивних деформацій	Обмежена	Так, за геометрією	Обмежена	Так, локально	Так, за 3D-моделлю і SHM-ознаками
Газова небезпека	Ні	Ні	Так	Ні	Так, з винесеним газозабірником 200–400 мм
Теплова небезпека	Ні/частково	Ні/частково	Так	Ні/частково	Так, як шар карти небезпек
Прогнозування обвалу	Ні	Частково	Ні	Частково	Так, через інтегральний індекс небезпеки
Зв'язок із рятувальником	Ні	Ні	Ні	Ні	Так, через ретранслятор і шолом рятувальника
Вихідний результат	Відео/фото	3D-модель	Теплова або газова карта	Дані моніторингу	3D-модель, газова карта, карта небезпек, безпечний маршрут

Порівняльні дані в табл. 2 показують, що типові відео-БПЛА ефективні для первинної візуальної розвідки, однак, їх можливості щодо оцінювання геометричних деформацій, газової небезпеки повітряного середовища та прогнозування обвалу будівель та споруд є обмеженими. БПЛА 3D/фотограмметрії забезпечують якісніше просторове подання об'єкта, але без інтеграції з тепловими, газовими та віброакустичними даними не дають повної картини ризику для рятувальників. Тепловізійні або газові БПЛА дозволяють виявляти окремі небезпеки, проте зазвичай не формують конструктивну карту небезпечних зон.

Найбільш суттєвою перевагою запропонованого комплексу за даними (табл. 2) є поєднання функцій, що в типових рішеннях реалізуються окремо: 3D-моделювання, візуальний аналіз, газовий контроль, тепловізійна діагностика, віброакустичний моніторинг, ретрансляція зв'язку та формування маршруту. Це дозволяє розглядати запроповану систему як інтегрований апаратно-програмний

засіб інформаційно-аналітичної підтримки керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, що забезпечує оперативне визначення зон допустимого, обмеженого або забороненого перебування особового складу.

Вибір базової платформи залежить від масштабу пошкодженого об'єкта, габаритів проходів, необхідної маси навісного обладнання та очікуваної тривалості виконання обстеження. Порівняння можливих платформ для реалізації запропонованого комплексу наведено в табл. 3.

Табл. 3. Порівняння варіантів базової платформи для реалізації БПЛА-комплексу

Варіант платформи	Переваги	Обмеження	Доцільне обладнання	Рекомендована сфера застосування
3–4" cinewhoop	Компактність, захист гвинтів, менші втрати енергії	Мала вантажопідйомність, короткий час польоту	FPV/RGB, LED, ToF, малий тепловізор	Вузькі проходи, коридори, первинний огляд
5" БПЛА у статичній клітці	Кращий захист, можливість контакту, більший запас під сенсори	Більші габарити, втрати часу польоту 20–35 %	LiDAR, тепловізор, газоаналізатор, SHM, LED	Зруйновані будівлі, завали, приміщення без GNSS
Промисловий мультикоптер	Вища вантажопідйомність і тривалість польоту	Недоцільний у тісних приміщеннях, слабший контактний захист	Потужний LiDAR, тепловізор, зовнішній газовий модуль	Фасади, дахи, відкриті промислові майданчики
Запропонована комбінована система	Поєднує indoor-БПЛА, ретранслятор і шолом рятувальника	Потребує комплексної валідації і калібрування	Повний модульний набір НК та ситуаційної обізнаності	Пошуково-рятувальні роботи на пошкоджених об'єктах

Аналіз (табл. 3) засвідчує, що жодна з базових платформ не є універсальною для всіх сценаріїв аварійно-рятувальних робіт. Компактні 3–4-дюймові cinewhoop-платформи мають перевагу в умовах вузьких проходів, коридорів і приміщень із великою кількістю перешкод, однак, обмежені за корисним навантаженням і часом польоту. 5-дюймовий БПЛА у статичній захисній клітці є більш придатним для розміщення LiDAR, тепловізора, газоаналізатора і SHM-модуля, але потребує врахування збільшених габаритів та втрат енергоефективності через каркасну оболонку.

Промислові платформи типу DJI Matrice 350 RTK або аналогічні рішення доцільні для зовнішнього обстеження фасадів, дахів та великих промислових об'єктів, однак, вони менш придатні для проникнення у завали та приміщення з малими отворами. Отже, дані (табл. 3) обґрунтовують доцільність дворівневої архітектури: компактний захищений БПЛА для внутрішньої розвідки та важча промислова платформа для зовнішнього обстеження й перенесення більш масивних сенсорів.

Для кількісного оцінювання небезпеки конструктивної зони запропоновано інтегральний індекс:

$$K_{\text{danger}} = w_1 K_{3D} + w_2 K_{\text{vis}} + w_3 K_{\text{thermal}} + w_4 K_{\text{vibro}} + w_5 K_{\text{gas}}, \quad (1)$$

де K_{danger} – інтегральний індекс небезпеки; K_{3D} – показник геометричних деформацій; K_{vis} – показник візуальних пошкоджень; K_{thermal} – показник теплової небез-

пеки; K_{vibro} – показник віброакустичної активності; K_{gas} – показник газової небезпеки; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти.

Умова нормування вагових коефіцієнтів має вигляд:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 = 1. \quad (2)$$

Геометричний показник за даними LiDAR може визначатися як:

$$K_{3D} = \frac{\Delta_{\text{fact}}}{\Delta_{\text{lim}}}, \quad (3)$$

де Δ_{fact} – фактичне відхилення, прогин, перекіс або зміщення, визначене за хмарою точок; Δ_{lim} – граничне значення відповідного параметра для конструктивного елемента.

Візуальний показник пошкодження доцільно визначати з урахуванням ваги окремих дефектів:

$$K_{\text{vis}} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i q_i}{\sum_{i=1}^n b_i}, \quad (4)$$

де q_i – оцінка інтенсивності i -ї ознаки пошкодження; b_i – ваговий коефіцієнт важливості цієї ознаки; n – кількість виявлених ознак.

Газоаналітичний показник визначається як максимальне відношення фактичної концентрації небезпечного компонента до його граничного значення:

$$K_{\text{gas}} = \max \left(\frac{C_{\text{CO}}}{C_{\text{CO}}^{\text{lim}}}, \frac{C_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4}^{\text{lim}}}, \frac{C_{\text{H}_2\text{S}}}{C_{\text{H}_2\text{S}}^{\text{lim}}}, \frac{C_{\text{VOC}}}{C_{\text{VOC}}^{\text{lim}}}, \frac{|O_2 - O_2^{\text{norm}}|}{\Delta O_2^{\text{lim}}} \right). \quad (5)$$

Оскільки на сьогодні відсутня уніфікована нормативна шкала для інтерпретації інтегрального індексу безпеки, що одночасно враховує геометричні деформації, візуальні пошкодження, теплові аномалії, віброакустичну активність і газову небезпеку, у роботі запропоновано попередню експертну класифікацію конструктивних зон, наведену в табл. 4. Порогові значення мають орієнтовний характер і призначені для первинної підтримки тактичних рішень під час аварійно-рятувальних робіт; у подальшому вони мають бути уточнені за результатами експериментальної валідації та порівняння з фактичними даними обстеження пошкоджених об'єктів.

Класифікація, наведена в табл. 4, перетворює результати багатосенсорного обстеження на тактичне рішення для керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації. За низького рівня безпеки допускається контрольований доступ, тоді як середній рівень вимагає уточнення даних, повторного сканування або короткочасного моніторингу. Високий рівень безпеки означає, що перебування рятувальників у зоні повинно бути обмеженим за часом і супроводжуватися додатковими стабілізаційними заходами.

Критичний рівень за табл. 4 має пріоритетне значення для безпеки особового

складу: у таких зонах доступ повинен бути заборонений до виконання стабілізації конструкцій, дистанційного розбору або додаткового інженерного обстеження. Таким чином, табл. 4 виконує роль інтерпретаційної шкали, яка пов'язує числове значення K_{danger} із практичними рішеннями щодо маршруту, тривалості роботи та допустимості входу в пошкоджену будівлю.

Табл. 4. Класифікація конструктивних зон за інтегральним індексом небезпеки

Значення K_{danger}	Рівень небезпеки	Стан зони	Тактичне рішення
0–0,30	низький	умовно безпечна	контрольований доступ дозволено
0,31–0,60	середній	потенційно небезпечна	потрібне уточнення і моніторинг
0,61–0,80	високий	небезпечна	доступ обмежити, роботи короткочасно
0,81–1,00	критичний	критично небезпечна	доступ заборонити, потрібна стабілізація або дистанційний розбір

Отже, запропонований індекс і наведена класифікація забезпечують перехід від окремих діагностичних ознак до тактичного рішення щодо допустимості перебування рятувальників у конкретній конструктивній зоні. Розгорнуту інтерпретацію результатів, поданих у табл. 1 – табл. 4 та на рис. 1, наведено в розділі обговорення результатів дослідження.

7. Розробка методики експериментального застосування та оцінювання ефективності БПЛА-комплексу

Методика експериментального застосування запропонованого БПЛА-комплексу спрямована на перевірку його працездатності в умовах, наближених до реальних пошуково-рятувальних робіт. Вона охоплює якість збору даних, механічну живучість конструкції, стабільність каналів зв'язку, точність сенсорів, коректність карти небезпек та безпечність дій особового складу.

Експериментальну перевірку запропонованого комплексу доцільно виконувати поетапно, із послідовним переходом від стендових випробувань до полігонного сценарію пошуково-рятувальних робіт.

На першому етапі проводиться стендова перевірка маси БПЛА, центра мас, часу зависання, температури моторів і регуляторів, вібрацій, стабільності роботи LiDAR, камер, газоаналізатора, ретранслятора та шолома рятувальника.

Передпольотна підготовка комплексу повинна включати окремі процедури калібрування для різних груп сенсорів. Газоаналізатор калібрується за нульовою та контрольними калібрувальними сумішами з перевіркою часу реакції; тепловізійний модуль перевіряється за еталонними температурними ділянками; LiDAR-сканер контролюється за відомими геометричними маркерами; модулі візуально-інерціальної навігації та одночасної локалізації і побудови карти проходять перевірку освітленості, якості зображення, інерціального блока та стабільності локалізації.

У методиці також необхідно передбачити аварійні режими. У разі втрати зв'язку БПЛА має перейти в режим зависання, контрольованого повернення до останньої стабільної точки або м'якої посадки залежно від умов простору. У разі втрати навігації за даними побудови карти або візуально-інерціальної одометрії

апарат повинен зменшити швидкість, увімкнути режим стабілізації за інерціальними та далекомірними датчиками й подати оператору попередження. При критичному розряді акумуляторної батареї пріоритетом є безпечна посадка або вихід із небезпечної зони. У випадку контакту з кабелями, потрапляння в уламки або перевероту доцільно передбачити режим аварійного вимкнення гвинтів, подання звукового/світлового сигналу та, за можливості, режим самоперевертання або відновлення положення.

На другому етапі порівнюються конфігурації без клітки, з кліткою, з окремими сенсорами та з повним комплектом обладнання. Втрата часу польоту може оцінюватися за формулою:

$$\Delta T = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де T_0 – час польоту без навантаження; T_i – час польоту з відповідною конфігурацією.

На третьому етапі виконуються контактні випробування оболонки. Імітуються торкання стіни, труби, сітки, арматури та уламків бетону на швидкостях 0,3; 0,5 і 1,0 м/с. Оцінюється пошкодження клітки, стабілізація після контакту, відхилення траєкторії, збереження відео та працездатність сенсорів.

На четвертому етапі створюється полігон у вигляді моделі пошкодженої будівлі з бетонними уламками, похилими плитами, імітаторами колон, прорізами, порожнинами та контрольними маркерами. Середня похибка 3D-моделі визначається як:

$$E_{3D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_i|, \quad (7)$$

де E_{3D} – середня похибка 3D-моделі; Δ_i – відхилення вимірної точки від еталонної; n – кількість контрольних точок.

На п'ятому етапі виконуються газові випробування. Порівнюються вимірювання при розміщенні газозабірника біля корпусу та при винесенні його на 200–400 мм. Стабільність показів визначається як:

$$S_{\text{gas}} = 1 - \frac{\sigma_c}{\bar{C}}, \quad (8)$$

де S_{gas} – стабільність газових вимірювань; σ_c – стандартне відхилення концентрації; \bar{C} – середнє значення концентрації.

Газові випробування повинні проводитися лише в контрольованих безпечних умовах із калібрувальними сумішами або навчальними імітаторами. Під час таких випробувань необхідно враховувати затримку пробовідбору, довжину газозабірної трубки, продуктивність мікронасоса, інерційність сенсорів, вплив пилу, вологи, температури та турбулентності повітряного потоку. Ефективність винесення газозабірника на 200–400 мм має бути підтверджена експериментально шляхом порівняння стабільності та часу реакції показів при різних положеннях газозабірника відносно площини гвинтів. БПЛА без вибухозахищеного виконання

не повинен застосовуватися у підтверджено вибухонебезпечному середовищі.

На шостому етапі проводяться тепловізійні випробування з тепловими мішенями, імітаторами постраждалих, нагрітими елементами та зонами тління. Перед їх виконанням необхідно провести перевірку температурного діапазону, калібрування тепловізора за еталонними ділянками та контроль впливу пилу, сажі, вологості й задимлення на якість теплового зображення.

На сьомому етапі проводяться віброакустичні випробування контрольних елементів із реєстрацією змін частот, акустичних імпульсів, амплітуди коливань і відповідності візуальному тріщиноутворенню. Для цього необхідно передбачити калібрування мікрофонів та акселерометрів, випробування в режимі зависання БПЛА, а також алгоритмічну фільтрацію шуму гвинтів, електродвигунів і повітряного потоку з метою відокремлення акустичних імпульсів конструкції від власних шумів БПЛА.

На восьмому етапі перевіряються канали БПЛА – оператор, БПЛА – ретранслятор – оператор, БПЛА/ретранслятор – шолом рятувальника. Оцінюються дальність, затримка, стабільність телеметрії, якість відео, коректність маршруту на шоломі та час повернення рятувальника до безпечної точки.

Комплексний сценарій передбачає моделювання ситуації: пошкоджена будівля, завал, газова небезпека, погана видимість і необхідність формування безпечного маршруту. БПЛА має виконати первинний огляд, 3D-сканування, тепловізійний пошук, газовий контроль, виявлення небезпечних конструкцій, передачу даних через ретранслятор і формування маршруту для рятувальника.

8. Обговорення результатів дослідження модульних БПЛА-комплексів для обстеження пошкоджених об'єктів

Отримані результати показують, що запропонований БПЛА-комплекс доцільно розглядати не як окремих літальний апарат із камерою, а як багаторівневу систему збору, передавання, обробки та візуалізації діагностичної інформації. На рис. 1 відображено апаратно-програмну логіку комплексу: бортові модулі формують первинні дані, ретранслятор забезпечує стійкість каналу зв'язку, а шолом рятувальника або станція керівника робіт використовуються для відображення карти небезпек і безпечного маршруту.

Результати з табл. 1 підтверджують, що запропонована система має функціонально завершений склад. LiDAR/3D-сканер відповідає за геометричну модель пошкодженого об'єкта, RGB/FPV-камера – за візуальну ідентифікацію дефектів, тепловізійний модуль – за виявлення температурних неоднорідностей, газоаналітичний модуль – за контроль небезпечного складу повітря, а віброакустичний модуль – за фіксацію ознак активного руйнування. У сукупності це забезпечує перехід від простого дистанційного спостереження до багатосенсорного неруйнівного контролю.

Порівняння, наведене в табл. 2, свідчить, що типові рішення здебільшого орієнтовані на одну провідну функцію: візуальний огляд, побудову тривимірної моделі, тепловізійний контроль, газоаналіз або структурний моніторинг. Запропонований комплекс відрізняється тим, що поєднує ці функції в єдину аварійно-рятувальну логіку: 3D-модель пошкодженого об'єкта, газова карта, тепла карта, віброакустичні ознаки активного руйнування, інтегральний індекс небезпеки та безпечний маршрут рятувальника розглядаються як взаємопов'язані елементи системи підтримки рішень.

Дані, що наведені в табл. 3 показують, що вибір базової платформи має залежати від масштабу об'єкта, габаритів проходів, маси навісного обладнання та очікуваної тривалості обстеження. Компактні 3–4-дюймові платформи доцільні для первинного огляду вузьких проходів, тоді як 5-дюймовий БПЛА у статичній захисній клітці краще відповідає задачам розміщення повного набору сенсорів. Промислові мультикоптери залишаються доцільними для зовнішніх фасадних або дахових обстежень, але не є оптимальними для проникнення у завали.

Класифікація в табл. 4 має прикладний характер і перетворює розрахований індекс K_{danger} у форму, зрозумілу для керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації. Водночас порогові значення 0,30; 0,60 та 0,80 мають попередній експертний характер. Їх подальше уточнення потребує полігонних випробувань, порівняння з результатами інженерного обстеження пошкоджених конструкцій і накопичення статистики реальних аварійно-рятувальних робіт.

Окремого обговорення потребує питання модульності. У межах запропонованого підходу модульність не зводиться до переліку встановлених сенсорів. Вона передбачає уніфіковані посадкові вузли, швидкознімні кріплення, розділені лінії електроживлення, цифровий протокол передавання даних, контроль балансування та можливість заміни модулів у польових умовах. Саме ця конструктивно-інформаційна уніфікація робить комплекс придатним для різних сценаріїв застосування.

До обмежень запропонованого рішення належать збільшення маси й аеродинамічного опору через статичну захисну оболонку, зниження часу польоту при встановленні повного комплексу сенсорів, потреба в калібруванні газових, тепловізійних, LiDAR та навігаційних модулів, а також необхідність фільтрації власних шумів БПЛА під час віброакустичного контролю. Ці обмеження не нівелюють переваги комплексу, але мають бути враховані під час створення дослідного зразка та методики його випробувань.

Загалом результати дослідження підтверджують, що наукова новизна запропонованого підходу полягає в інтеграції багатосенсорних даних у єдиний індекс небезпеки конструктивної зони та формуванні карти тактичного ризику для рятувальника в умовах пошкоджених будівель. Це створює підстави для подальшої експериментальної валідації комплексу, уточнення вагових коефіцієнтів індексу та розроблення дослідного зразка для підрозділів цивільного захисту.

9. Висновки

1. У роботі розроблено структуру, склад і конструктивну інтеграцію модульного БПЛА-комплексу для дистанційного обстеження пошкоджених об'єктів. Запропоновано розглядати безпілотний літальний апарат не лише як засіб відеорозвідки, а як мобільну платформу неруйнівного контролю, комп'ютерного 3D-моделювання, тепловізійної діагностики, газового моніторингу та віброакустичного контролю. До складу комплексу включено безпілотний літальний апарат зі статичною сегментованою захисною оболонкою, LiDAR/3D-сканер, RGB/FPV-камеру, тепловізійний модуль, газоаналітичний модуль із винесеним газозабірником, модуль ближньої навігації та стабілізації висоти, бортовий обчислювально-навігаційний модуль, віброакустичний модуль моніторингу технічного стану конструкцій, світлодіодне підсвічування, наземний ретранслятор зв'язку та шолом рятувальника з навігаційним модулем. Показано, що модульність комплексу повинна забезпечуватися уніфікованим механічним інтерфейсом, швидкознімними

кріпленнями, захищеною системою електроживлення, цифровим протоколом передавання даних, герметизацією, балансуванням і можливістю заміни модулів у польових умовах.

2. У межах другого завдання дослідження розроблено підхід до інтеграції багатосенсорних даних у єдиний індекс небезпеки конструктивної зони. Запропонований індекс K_{danger} поєднує показники геометричних деформацій, візуальних пошкоджень, теплових аномалій, віброакустичної активності та газової небезпеки. На його основі сформовано попередню експертну класифікацію конструктивних зон за рівнями небезпеки, яка дозволяє пов'язати результати дистанційного обстеження з тактичними рішеннями керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації: дозволити контрольований доступ, призначити додатковий моніторинг, обмежити перебування особового складу або заборонити доступ до критично небезпечної зони. Встановлено, що перевага запропонованого комплексу полягає у формуванні не окремих відео-, теплових, газових або геометричних даних, а інтегрованої карти небезпек і безпечного маршруту рятувальника.

3. Розроблено методику експериментального застосування та оцінювання ефективності БПЛА-комплексу. Методика передбачає стендові випробування, передпольотну калібровку LiDAR-сканера, тепловізійного модуля, газоаналізатора, модулів візуально-інерціальної навігації та одночасної локалізації і побудови карти, контактні випробування захисної оболонки, перевірку захисту сенсорів, 3D-сканування полігону пошкодженої будівлі, газові, тепловізійні й віброакустичні випробування, тестування аварійних режимів, перевірку каналів зв'язку та комплексний сценарій пошуково-рятувальних робіт. Практичне застосування запропонованого комплексу дозволяє скоротити час первинної розвідки, зменшити ризик для особового складу, уточнювати небезпечні зони після кожного етапу розбору завалів і підвищити обґрунтованість рішень під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Перспективами подальших досліджень є експериментальна валідація порогових значень K_{danger} , уточнення вагових коефіцієнтів інтегрального індексу, розроблення алгоритмів автоматичного розпізнавання небезпечних зон і створення дослідного зразка БПЛА-комплексу для підрозділів цивільного захисту.

Література

1. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 92. P. 79–97. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
2. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*. 2014. Vol. 6(1). P. 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x
3. Ham Y., Han K. K., Lin J. J., Golparvar-Fard M. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*. 2016. Vol. 4. Article 1. P. 1–8. doi: 10.1186/s40327-015-0029-z
4. Kim H., Lee J., Ahn E., Cho S., Shin M., Sim S.-H. Concrete crack identification using a UAV incorporating hybrid image processing. *Sensors*. 2017. Vol. 17(9). 2052. P. 1–14. doi: 10.3390/s17092052
5. Aljagoub D., Na R., Cheng C., Shen Z. Performance evaluation of uncooled UAV infrared camera in detecting concrete delamination. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7(12). 163. P. 1–26. doi: 10.3390/infrastructures7120163
6. Burgués J., Marco S. Environmental chemical sensing using small drones: a civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-3

view. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 748. Article 141172. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141172

7. Farrar C., Worden K. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007. Vol. 365(1851). P. 303–315. doi: 10.1098/rsta.2006.1928

8. Worden K., Farrar C. R., Manson G., Park G. The fundamental axioms of structural health monitoring. *Proceedings A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007. Vol. 463(2082). P. 1639–1664. doi: 10.1098/rspa.2007.1834

9. Cadena C., Carlone L., Carrillo H., Latif Y., Scaramuzza D., Neira J., Reid I., Leonard J. J. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32(6). P. 1309–1332. doi: 10.1109/TRO.2016.2624754

10. Zeng Y., Zhang R., Lim T. J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2016. Vol. 54(5). P. 36–42. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933

11. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic construction digital twin: directions for future research. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. Article 103179. P. 1–16. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103179

12. Шевченко Р. Як працює FPV-дрон на оптоволокну. Реальність і технічні обмеження. URL: <https://wiydrones.com/blog/yak-pracyuye-fpv-dron-na-optovolokni-check-mark-realnist-i-tehnichni-obmezhennya>

V. Tomenko¹, PhD, Associate Professor, Doctoral Student

A. Kovalov¹, DSc, Senior Research, Head of Department

R. Melnyk¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

O. Melnyk¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Tomenko², PhD, Associate Professor, Forensic Expert

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, Cherkasy, Ukraine*

DEVELOPMENT OF UAV COMPLEXES FOR INSPECTION OF DAMAGED OBJECTS USING COMPUTER GRAPHICS

The article substantiates the concept of creating a modular unmanned aerial vehicle complex for remote inspection of damaged buildings and structures in the emergency zone. It is proposed to consider an unmanned aerial vehicle not only as a means of video reconnaissance, but also as a mobile platform for non-destructive testing, spatial modeling, gas monitoring, thermal imaging analysis and assessment of the risk of collapse of structural elements. It is substantiated that the effectiveness of such a complex is determined not by a separate sensor, but by the coordinated operation of onboard, ground and wearable modules that provide collection, transmission, processing and visualization of diagnostic information. The complex includes an unmanned aerial vehicle with a static segmented protective shell, a laser scanner for building a three-dimensional model, a color video camera, a thermal imaging module, a gas analyzer with a remote gas intake, a short-range navigation and altitude stabilization module, an on-board computing and navigation module, a vibroacoustic module for monitoring the technical condition of structures, LED lighting, a ground communication repeater, and a rescuer's helmet with a navigation module. An integral hazard index of the structural zone is proposed, which takes into account geometric deformations, visual damage, thermal anomalies, vibroacoustic activity, and gas hazard. The result of using the complex is the formation of a three-dimensional model of the damaged object, a gas map, a hazard map, and a safe rescuer's route. The practical value of the proposed approach is to reduce the time of primary reconnaissance, reduce the risk to personnel, increase the validity of the decisions of the emergency response manager and create an information basis for planning the sequence of clearing the rubble. This approach increases the efficiency and safety of rescue operations.

Keywords: damage, thermal imaging diagnostics, hazard map, integral hazard index, rescuer's route

References

1. Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013
2. Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x
3. Ham, Y., Han, K. K., Lin, J. J., Golparvar-Fard, M. (2016). Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*, 4, 1, 1–8. doi: 10.1186/s40327-015-0029-z
4. Kim, H., Lee, J., Ahn, E., Cho, S., Shin, M., Sim, S.-H. (2017). Concrete crack identification using a UAV incorporating hybrid image processing. *Sensors*, 17(9), 2052, 1–14. doi: 10.3390/s17092052
5. Aljagoub, D., Na, R., Cheng, C., Shen, Z. (2022). Performance evaluation of uncooled UAV infrared camera in detecting concrete delamination. *Infrastructures*, 7(12), 163, 1–26. doi: 10.3390/infrastructures7120163
6. Burgués, J., Marco, S. (2020). Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Science of the Total Environment*, 748, 141172. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141172
7. Farrar, C. R., Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365(1851), 303–315. doi: 10.1098/rsta.2006.1928
8. Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., Park, G. (2007). The fundamental axioms of structural health monitoring. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2082), 1639–1664. doi: 10.1098/rspa.2007.1834
9. Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., & Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309–1332. doi: 10.1109/TRO.2016.2624754
10. Zeng, Y., Zhang, R., Lim, T. J. (2016). Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 36–42. doi: 10.1109/MCOM.2016.7470933
11. Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179, 1–16. doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179
12. Shevchenko, R. How a fiber optic FPV drone works. Reality and technical limitations. Available at: <https://wiydrones.com/blog/yak-pracyuye-fpv-dron-na-optovolokni-check-mark-realnist-i-tehnichni-obmezhennya>

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026