

УДК 69.059-047.38:[004.942:629.735-049.7]

О. В. ГОРДА¹, Ю. М. ЧЕРВЯКОВ², А. П. ГРИГОРОВСЬКИЙ^{3*}

¹Каф. «Інформаційні технології проектування та прикладної математики», Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітрофлотський, 31, Київ, Україна, 03680, тел. +38 (050) 135 78 40, ел. пошта anaelg@ukr.net, ORCID 0000-0001-7380-0533

²ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В. С. Балицького», просп. В. Лобановського, 51, Київ, Україна, 03110, тел. +38 (067) 328 48 52, ел. пошта budmat68@gmail.com, ORCID 0000-0002-1326-6217

^{3*}ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В. С. Балицького», просп. В. Лобановського, 51, Київ, Україна, 03110, тел. +38(063) 155 05 12, ел. пошта a.grigorovski@gmail.com, ORCID 0000-0003-0009-2358

Розробка будівельних інформаційних моделей процесу дистанційного обстеження аварійних будівель із використанням безпілотних літальних апаратів

Мета. Прийняття організаційно-технологічних рішень щодо ліквідації наслідків руйнувань будівель від понаднормових впливів через воєнні дії базується на оперативному отриманні інформації про технічний стан об'єкта. Проведення першочергових аварійно-рятувальних робіт безпосередньо після катастрофи чи аварії, коли є загроза людському життю, потребує швидкого прийняття таких рішень в умовах невизначеності щодо запобігання вторинним руйнуванням. У зв'язку з цим основною метою роботи є мінімізувати тривалість процесу прийняття рішень в умовах невизначеності шляхом оптимізації технології отримання інформації, тобто процесу обстеження з використанням автоматизованих дистанційно керованих літальних апаратів, у сукупності з будівельно-інформаційним моделюванням процесу отримання та обробки інформації про технічний стан об'єкта. **Методика.** Проаналізовано фактори впливу на несучу здатність та організаційно-технологічні особливості процесу втрати міцності бетонних і залізобетонних будівельних елементів у випадку підризу на їх поверхні відкритого заряду. Для складання інформаційної моделі динамічного руйнування враховано зростання та злиття мікротріщин під впливом прикладених напружень. **Результати.** Описано процес дистанційного обстеження пошкоджених у наслідок воєнних дій будівель з використанням безпілотних літальних апаратів. За результатами аналізу цього процесу розроблено методику інформаційного моделювання руйнувань будівель від позапроектних впливів. Наведено етапи побудови інформаційної моделі пошкодженого об'єкта. **Наукова новизна.** Уперше розроблено методику будівельно-інформаційного моделювання часткових руйнувань великопанельних будівель від позапроектних впливів для оптимізації організаційно-технологічних рішень із підсилення конструкцій в осередках таких руйнувань та можливості виконання термінових аварійно-рятувальних робіт. **Практична значимість.** Обґрунтовано зменшення тривалості та ризику прийняття неефективних рішень в умовах недостатньої інформації про пошкоджений об'єкт за рахунок інформаційного моделювання з використанням безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: великопанельна будівля; позапроектний вплив; руйнування; підсилення конструкцій; будівельно-інформаційне моделювання; аварійно-рятувальні роботи

Вступ

Розробка організаційно-технологічних заходів із ліквідації наслідків руйнувань будівель від понаднормових впливів через воєнні дії потребує оперативного отримання інформації про технічний стан пошкодженого об'єкта, до того ж виконання першочергових аварійно-рятувальних робіт безпосередньо після катастрофи чи аварії потребує швидкого прийняття рішень в умовах невизначеності. Ефективність

аварійно-рятувальних і відновлювальних робіт залежить від своєчасної достовірної та об'єктивної інформації щодо місця та обсягів руйнувань від позапроектного впливу. Для отримання такої інформації можна використовувати безпілотні літальні апарати [9, 10].

У зв'язку з розширенням застосування та вдосконаленням безпілотних літальних апаратів і веб-камер задача розробки методів та алгоритмів збору й обробки даних моніторингу зон руйнування об'єктів набуває актуального

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

значення (рис. 1). Облік реального часу для опрацювання потоку зображень обумовлює різке збільшення необхідного обсягу обчислюва-

льного обладнання та витрат часу на виконання розрахунків. Альтернативою є застосування методів математичної морфології [3, 5, 6].



Рис. 1. Обстеження пошкоджених унаслідок воєнних дій будівель із використанням безпілотних літальних апаратів фахівцями ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В. С. Балицького» (м. Ірпінь, квітень 2022 р.)

Fig. 1. Examination buildings damaged as a result of military operations with the use of unmanned aerial vehicles by specialists of the SE «Research Institute of Construction Production named after V. S. Balytskyi» (Irpin, April 2022)

Актуальною є розробка нових цифрових методів і засобів, що відрізняються не тільки ефективним і якісним, але й швидким формуванням віртуального образу (цифрового зображення) об'єкта за рахунок зменшення обсягу необхідних розрахунків шляхом кодування відеоінформаційних сигналів. Цифрове зображення (далі – 3D) – це масив даних, отриманий шляхом дискретизації (аналого-цифрового перетворення) оригіналу. Після кодування за допомогою певного алгоритму й запису на носій цей масив даних стає файлом.

Синтез таких методів і засобів дозволить забезпечити сучасні вимоги до використання відеоінформаційних систем, оптимізувати прийняття рішень безпосередньо після катастрофи чи аварії, коли є загроза людському здоров'ю та життю.

Мета

Ця стаття спрямована на розробку методики будівельно-інформаційного моделювання часткових руйнувань великопанельних будівель від позапроектних впливів для оптимізації організаційно-технологічних рішень із підкріплення та посилення конструкцій і ділянок в осередках руйнувань та можливості своєчасного виконання термінових аварійно-рятувальних робіт.

Методика

Отримання інформації про пошкоджений об'єкт у режимі реального часу в процесі моніторингу має враховувати такі особливості:

- форма об'єкта значно модифікується залежно від його розташування відносно елементів сканувальної лінійки, його яскравість змінюється в десятки разів;

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

– кадри тієї самої послідовності не приведені до єдиної системи координат;

– часова стаціонарність фону спостерігається лише на двох-трьох кадрах одного напряму сканування;

– розмір вибраного фрагмента спостережень суттєво впливає на обсяг розрахунків.

Традиційне виконання обстеження для оцінки технічного стану будівельного об'єкта – це тривалий, багатофункціональний процес, вразливий до впливу людського фактора й помилок, які, у свою чергу, призводять до необ'єктивних висновків.

Інформаційно-математична модель надає можливість швидко отримати точну та об'єктивну комплексну оцінку технічного стану будівельного об'єкта в цілому, враховуючи при цьому стан кожного його конструкційного елемента – від фундаментної частини до покрівлі. Водночас втручання людини в процес отримання інформації мінімізовано, а всі пошкодження будівельного об'єкта оброблюють згідно з уніфікованим алгоритмом дій [1, 2, 4].

Інформаційне моделювання – це процес, що складається з етапів, результати яких являють собою інформаційні моделі будівлі, що різняться одна від одної структурою об'єкта та індивідуальними вимогами щодо розв'язання конкретних задач. Таким чином, інформаційна модель – це об'єкт досить мінливий, який залежить від складності задач що потребують розв'язання. Напрацьований досвід використання BIM-технологій дозволяє говорити про деяку загальну структуру інформаційної моделі будівлі під час розв'язання задач щодо її відновлення. Інформаційна модель повинна поєднувати дані різних типів і форматів. Як ядро інформаційної моделі ефективно використовують геометричну модель, яка семантично пов'язує інформацію про процеси, що відбуваються в середині об'єкта, і дії над об'єктом [7, 8]. Геометричну модель спочатку будують як об'єктно-орієнтовану параметричну 3D-модель. Отримати необхідну вихідну інформацію для формування об'єктивних характеристик, що динамічно змінюються в часі, фрагментів об'єкта з метою найповніше формалізувати опис структури споруди можна на основі зображень із веб-камери безпілотного літального апарата.

У цій статті модель динамічного руйнування, де руйнування розглядають як процес росту та злиття мікротріщин під впливом прикладених напружень, використовують для аналізу міцності і стійкості бетонних і залізобетонних конструкцій та ділянок об'єкта для випадку руйнівного впливу ударної хвилі внаслідок зовнішнього вибуху та в разі підриву на поверхні конструкцій відкритого заряду, тобто у випадку контактної/внутрішнього вибуху.

Результати

Залежно від ступеня пошкодження конструкції можуть бути аварійними, непридатними до відновлення, придатними до відновлення з необхідністю їх демонтажу або без демонтажу [4, 7]. Дефекти, що виникають у наслідок позапроектних впливів на будівлю або споруду, є багатоплановими, і їх перелік відкритий до доповнення. Основними з них, за принципом впливу на конструкційні елементи, є такі:

– стіни: відшарування штукатурного покриття; випучування; намокання основи будівлі; наскрізна діагональна тріщина; вертикальні тріщини; діагональні тріщини; вертикальні тріщини в залізобетонній монолітній стіні; руйнування основи; тріщина по штукатурному шару; тріщина в місці примикання плити перекриття; тріщина у віконній перемишці; зазор між стіною та вимощенням; руйнування захисного шару бетону перемишок; вивітрювання розчину зі швів мурування; руйнування окремих цеглин мурування; протікання ґрунтових вод; похилі тріщини на поверхні фасаду; порушення просторової жорсткості; тріщини в бетоні стінової панелі;

– перекриття: деформація металевих балок; тріщини в перекритті; сколювання ребра плити перекриття; руйнування арочної дуги склепінчастого перекриття; розрив металевої стяжки перекриття; тріщина по склепінчастому перекриттю; обсіпання штукатурки; руйнування захисного шару перекриття; відсутність захисного шару балок перекриття; обвалення конструкції перекриття; тріщини по деформаційному шву; тріщини по стелі; руйнування ребра плити перекриття;

– покрівля: відсутність організованого водосток; протікання по плитах покриття; утворення повітряних пухирів; порушення прими-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

кання до парапету; руйнування опорного бруса; намокання кроквяних ніг та латування; руйнування ділянки карнизу; відсутність захисних ковпаків.

Основна частина геометричної моделі попередньо містить схематичну модель геометрії об'єкта, яку формують із припущеннями. Віртуальний об'єкт (модель) буде приблизно відповідати реальній геометрії наявної будівлі, наприклад, у випадку, коли залишки конструкцій недоцільно контролювати геодезичними методами або коли наявна інформація дозволяє використати типовий проєкт чи об'єкт-аналог. Схематична геометрія забезпечує описання взаємодії (з'єднання) складових елементів будівельного об'єкта. Її можна використовувати, зокрема, для створення схеми розрахунків стійкості будівлі до зовнішніх навантажень, а також під час можливої експлуатації або розробки проєкту реставрації чи капітального ремонту.

До задач створення онтології 3D об'єкта належать:

- створення цілісної системи будівель, яка забезпечує інформаційну підтримку спеціалістів та експертів різних галузей, у межах яких використовують або досліджують 3D;

- формування предметної галузі для забезпечення автоматизації висновків у межах інтелектуальної бази знань 3D з метою побудови інтелектуального (автоматизованого) розпізнавання та класифікації відповідного 3D, оскільки останнє є складною, комбінованою в інформаційному плані, галуззю знань;

- забезпечення синтезу алгоритмів інтеграції висновків для кожної конкретної формалізованої прикладної задачі, оскільки база знань в онтології цифрових зображень є інтегрованою з бази прикладних галузей знань;

- можливість побудови метрик із сукупності 3D з метою застосування методів кластерного аналізу, розробки розрахункового методу формування внутрішнього каталогу нерухомих об'єктів із серії кадрів.

Використання кольору під час аналізу зображення об'єкта дозволяє визначити малі структури та слабо структуровані області, оскільки кольоровість є презентабельною ознакою зображення, навіть у випадку незначної яскравості.

Із точки зору кольорного атласу, зображення об'єкта являє собою такі сукупності:

- кольорні плями різної структури (градієнти, кольори, візерунки);
- границі між кольорними плямами;
- відношення суміжності, що задані на цій сукупності плям;
- абсолютні величини, що задані функціями присутності плям;
- взаємні пропорції.

Синтез початкової онтології кольорних областей 3D складається з таких елементів:

- універсуму – безпосереднього цифрового зображення об'єкта на носії зображення;
- палітру кольору на носії зображення;
- топології носія зображення, зв'язності, торкання, околиці, області;
- структур на носії зображення;
- кластера на носії зображення;
- ознак як функцій на носії зображення;
- параметрів на носії зображення;
- дескрипторів на носії зображення;
- фігур на носії зображення;
- шумів і структури шумів на носії зображення;
- фону на носії зображення;
- для областей: кольори, градієнти, текстури.

Із використанням кольорного атласу зображення об'єкта можна відтворювати локальні анізотропні ознаки як незалежні зміни в кожній точці зображення, які формують неоднорідність між локаціями відповідних плям.

Побудову процедури приведення сукупності зображень об'єкта, виконаних уздовж однієї траєкторії переміщення веб-камери, до одного ракурсу моніторингу методом порівняння кутів оптичної осі конуса огляду до поверхні моніторингу в різних точках траєкторії також реалізують за рахунок кольорного атласу.

За допомогою методу кольорного атласу для зображень об'єкта будують послідовність кольорних портретів з урахуванням локальних градієнтів кольору та форми однокольорової локальної області. Отримані кольорні портрети зображення об'єкта в сукупності з локацією та орієнтацією веб-камери дозволяють побудувати динамічний ряд вимірювань його кольорного атласу. У термінах кольорного атласу це дозволяє будувати або визначати конструкції областей на зображенні та

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

набори форм областей, притаманних кожному конкретному ряду.

Усе вказане вище дозволяє визначати лінійні та висотні розміри об'єкта.

Сучасні веб-камери безпілотних літальних апаратів мають у своєму складі далекоміри, висотоміри та гіроскопи, які дозволяють разом з апаратурою позиціонування точно фіксувати місце розташування центра тяжіння та орієнтацію платформи веб-камери.

За результатами аналізу ЗО визначають:

- характеристики масиву тріщин;
- розподіл атипових колірних плям;
- розподіл атипових градієнтів колірних плям;
- сферичну та циліндричну локалізацію симетрії втрат і пошкоджень.

Вихідні дані для складання алгоритму розрахунку:

- типовий проєкт великопанельної будівлі;
- значення показників міцності, узятих із проєкту матеріалів;
- можливе врахування допустимих нормативними документами або проєктом відхилень геометричних параметрів і характеристик міцності конструкцій;
- постійні, довготривалі, тимчасові навантаження, які сприймає будівля під час експлуатації;
- позапроєктні навантаження, що призводять до руйнування конструкційних елементів будівлі; прогноз обсягу потенційних руйнувань залежно від потужності позапроєктного навантаження та розташування можливих руйнувань унаслідок такого впливу;
- геометричні параметри та характеристики міцності комплектів тимчасового кріплення для виконання варіативного розрахунку із забезпечення стійкості будівлі після виконання стабілізаційних заходів.

Для інтерпретації вихідних даних і даних обстеження під час перетворення візуальної інформації в цифрове зображення вихідна відеоінформація повинна відповідати таким вимогам:

- зображення містять фон (стаціонарну частину сигналу), випадкові шуми та об'єкт;
- статистичні характеристики фону значно змінюються по полю кадру: дисперсія фону, швидкість спаду форми кореляційної функції змінюється, кореляційні залежності анізотропні

(кореляція в напрямі сканування перевищує кореляцію вздовж сканувальної лінійки);

– випадковий шум, що супроводжує вимірювання, має однаковий порядок малості з одним розподілом шкали квантування сигналу і стаціонарний по кадру та за часом, характер розподілу шуму близький до нормального;

– об'єкт та його форма модифікується залежно від розташування щодо елементів сканувальної лінійки;

– кадри однієї й тієї ж послідовності не приведені до єдиної системи координат, уздовж лінійки кадр зміщується менш ніж на його розмір;

– тимчасова стаціонарність фону спостерігається лише на двох-трьох кадрах одного напрямку сканування;

– тимчасова стаціонарність шуму об'єктів та фону під час прямого та зворотного сканування значно відрізняється;

– зображення можуть містити відблиски.

Вихідними даними для побудови інформаційної моделі є сукупність зображень-фіксацій об'єкта, отриманих у результаті дрейфу веб-камери за вертикаллю, горизонталлю та азимутом відносно об'єкта для визначення непошкодженої, зруйнованої зони та зони можливого руйнування, а також зони, що може підлягати відновленню.

За результатами аналізу процесу дистанційного обстеження з використанням безпілотних літальних апаратів встановлено, що побудову інформаційної моделі доцільно здійснювати за алгоритмом, що передбачає отримання інформації про об'єкт за етапами визначення характеристик таких елементів:

1. Прямокутні паралелепіпеди приміщень будівлі.
2. Плити перекриття.
3. Внутрішні та зовнішні стінові панелі.
4. Несучі балки (за наявності).
5. Відсутні частини з п. 1–4, наприклад, ліфтові шахти.
6. Сходові марші, майданчики та стіни.
7. Балкони та навіслі конструкції.
8. Відсутні частини з п. 6–7, наприклад, кровляна система за наявності схилого даху.
9. Колірні плями з п. 1–4 та 6–7.
10. Поверхня даху.
11. Втрати за п. 10.
12. Колірні плями з п. 10.

13. Зображення фундаменту.
 14. Втрати за п. 13.
 15. Колірні плями за п. 14.
 16. Пов'язані зони втрат.
 17. Зони можливого обвалення елементів споруди на основі кольорних плям пов'язаних зон втрат.
 18. Вертикальні та горизонтальні тунелі руйнування.
 19. Обвалення фасадів.
 20. Зони цілісності споруди.
- Деталізацію моделювання етапів процесу дистанційного обстеження з використанням безпілотних літальних апаратів буде наведено в наступних роботах.

Наукова новизна та практична значимість

Організаційно-технологічне проектування, тобто розробка проекту організації будівництва (ПОБ) та проекту виконання будівельних робіт (ПВР), передбачає вивчення матеріалів вишукувань, стану навколишнього середовища, можливостей будівельної організації, її технічної бази тощо, що потребує тривалого часу. Зменшити тривалість та ризик прийняття неефективних рішень в умовах недостатньої інформації про пошкоджений об'єкт можна за рахунок інформаційного моделювання процесу отримання інформації з використанням безпілотних літальних апаратів.

У рамках наукової статті викладено вперше розроблену методіку будівельно-інформаційного моделювання часткових руйнувань великопанельних будівель від позапроектних впливів для оптимізації організаційно-технологічних рішень із підкріплення та підсилення конструкцій і ділянок будівлі в осередках таких руйнувань та можливості виконання термінових аварійно-рятувальних робіт.

Практична значимість наукового дослідження полягає в мінімізації часу та ризику прийняття неефективних рішень в умовах недостатньої інформації про пошкоджений у результаті позапроектного впливу об'єкт.

Висновки

1. З'ясовано, що зменшити тривалість і ризик прийняття неефективних рішень щодо пошкодженого об'єкта можна за допомогою інформаційного моделювання з використанням безпілотних літальних апаратів.

2. З аналізу процесу дистанційного обстеження пошкоджених у наслідок воєнних дій будівель за допомогою безпілотних літальних апаратів встановлено, що інформаційну модель доцільно будувати за етапами визначення характеристик конструкцій елементів та планувальних особливостей пошкодженого об'єкта.

3. Розроблено методіку будівельно-інформаційного моделювання часткових руйнувань великопанельних будівель від позапроектних впливів. Наведено етапи здійснення побудови інформаційної моделі об'єкта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Григоровський П. Є., Горда О. В., Чуканова Н. П. Інформаційне моделювання будівель для вибору систем інструментального моніторингу на різних етапах життєвого циклу. *Будівельне виробництво*. 2019. № 68. С. 15–19.
2. Іваник І. Г., Віхоть С. І., Пожар Р. С., Іваник Я. І., Вибранець Ю. Ю. *Основи реконструкції будівель і споруд*. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 272 с.
3. Маковейчук О. М., Худов Г. В. Методи математичної морфології. *Системи обробки інформації*. 2008. Вип. 7 (74). С. 137–141.
4. Михайленко В. М., Русан І. В., Григоровський П. Є., Терентьев О. О., Свідерський А. Т., Горбатюк Є. В. *Моделі і методи інформаційної системи діагностики технічного стану об'єктів будівництва* : підручник. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 325 с.
5. Giardina C. R., Dougherty E. R. *Morphological Methods in Image and Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, 1988. 321 p.
6. Goutsias J., Vincent L., Bloomberg D. S. *Mathematical morphology and its application to image and signal processing*. New York : Springer New York, 2000. 446 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/b117970>

7. Hryhorovskiy P., Osadcha I., Jurelionis A., Basanskyi V., Hryhorovskiy A. A BIM-based method for structural stability assessment and emergency repairs of large-panel buildings damaged by military actions. *Buildings*. 2022. Vol. 12. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111817>
8. Leite F., Akcamete A., Akinci B., Atasoy G., Kiziltas S. Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*. 2011. Vol. 20. Iss. 5. P. 601–609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.027>
9. Rizo-Maestre C., González-Avilés Á. Galiano-Garrigós A., Andújar-Montoya M. D., Puchol-García J. A. UAV + BIM : Incorporation of Photogrammetric Techniques in Architectural Projects with Building Information Modelling Versus Classical Work Processes. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 14. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142329>
10. Syed U., Mohit J. Digital monitoring and modeling of construction supply chain management scheme with BIM and GIS : An overview. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures*. 2022. Vol. 65. Part 2. P. 1908–1914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.160>

O. V. GORDA¹, YU. M. CHERVYAKOV², A. P. HRYHOROVSKIY^{3*}

¹Dep. «Information Technologies of Design and Applied Mathematics», Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotskyi Ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03680, tel. +38 (050) 135 78 40, e-mail anaelg@ukr.net, ORCID 0000-6000-1673-8060-533

²State «Research Institute of Building Production Named of V.S. Balitsky», V. Lobanovskiy Ave., 51, Kyiv, Ukraine, 03110, tel. +38 (067) 328 48 52, e-mail budmat68@gmail.com, ORCID 0000-0002-1326-6217

^{3*}State «Research Institute of Building Production Named of V.S. Balitsky», V. Lobanovskiy Ave., 51, Kyiv, Ukraine, 03110, tel. +38(063) 155 05 12, e-mail a.grigorovski@gmail.com, ORCID 0000-0003-0009-2358

Development of Building Information Models for the Process of Remote Inspection of Emergency Buildings Using Unmanned Aerial Vehicles

Purpose. Making organizational and technological decisions to eliminate the consequences of building destruction from excessive impacts due to military operations is based on the prompt receipt of information about the technical condition of the object. Carrying out priority emergency rescue operations immediately after a disaster or accident, when there is a threat to human life, requires rapid decision-making in the face of uncertainty about preventing secondary damage. In this regard, the main goal of the work is to minimize the duration of the decision-making process under conditions of uncertainty by optimizing the technology of obtaining information, that is, the process of inspection using automated remote-controlled aircraft, in conjunction with building information modeling of the process of obtaining and processing information about the technical condition of the object. **Methodology.** The factors influencing the bearing capacity and organizational and technological features of the process of loss of strength of concrete and reinforced concrete building elements are analyzed in the event of an open charge detonation on their surface. The growth and fusion of microcracks under the influence of applied stresses were taken into account to develop an information model of dynamic fracture. **Findings.** The process of remote inspection of buildings damaged as a result of military operations using unmanned aerial vehicles is described. Based on the results of the analysis of this process, a methodology for information modeling of building destruction from off-design impacts has been developed. The stages of building an information model of the damaged object are presented. **Originality.** For the first time, a methodology for building information modeling of partial destruction of large-panel buildings from off-design impacts has been developed to optimize organizational and technological solutions for strengthening structures in the centers of such destruction and the possibility of performing urgent rescue operations. **Practical value.** The paper substantiates the reduction of the duration and risk of making ineffective decisions in conditions of insufficient information about the damaged object due to information modeling using unmanned aerial vehicles.

Keywords: large-panel building; off-design impact; destruction; structural reinforcement; building information modeling; rescue operations

REFERENCES

1. Hryhorovskiy, P. Ye., Horda, O. V., & Chukanova, N. P. (2019). Information modeling of buildings for selection of instrumental monitoring systems at different stages of the life cycle. *Construction Production*, 68, 15-19. (in Ukrainian)
2. Ivanyk, I. H., Vikhot, S. I., Pozhar, R. S., Ivanyk, Ya. I., & Vybranets, Yu. Yu. (2013). *Osnovy rekonstruktivnoyi budiveli i sporud*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. (in Ukrainian)
3. Makoveychuk, A. N., & Khudov, G. V. (2008). Methods of mathematical morphology. *Information Processing Systems*, 7(74), 137-141. (in Ukrainian)
4. Mikhajlenko, B. M., Rusan, I. V., Ghryghorovskiy, P. Je., Terentijev, O. O., Sviderskij, A. T., & Ghorbatjuk, Je. V. (2018). *Modeli i metody informacijnoji systemy diagnostyky tekhnichnogho stanu ob'ektiv budivnytva: pidruchnyk*. Kyiv: TsP «Komprynt». (in Ukrainian)
5. Giardina, C. R., & Dougherty, E. R. (1988). *Morphological Methods in Image and Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall. (in English)
6. Goutsias, J., Vincent, L., & Bloomberg, D. S. (2000). *Mathematical morphology and its application to image and signal processing*. New York: Springer New York. DOI: <https://doi.org/10.1007/b117970> (in English)
7. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., & Hryhorovskiy, A. (2022). A BIM-based method for structural stability assessment and emergency repairs of large-panel buildings damaged by military actions. *Buildings*, 12(11), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12111817> (in English)
8. Leite, F., Akcamete, A., Akinci, B., Atasoy, G., & Kiziltas, S. (2011). Analysis of modeling effort and impact of different levels of detail in building information models. *Automation in Construction*, 20(5), 601-609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.027> (in English)
9. Rizo-Maestre, C., González-Avilés, Á. Galiano-Garrigós, A., Andújar-Montoya, M. D., & Puchol-García, J. A. (2020). UAV + BIM: Incorporation of Photogrammetric Techniques in Architectural Projects with Building Information Modelling Versus Classical Work Processes. *Remote Sensing*, 12(14), 23-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142329> (in English)
10. Syed, U., & Mohit, J. (2022). Digital monitoring and modeling of construction supply chain management scheme with BIM and GIS: An overview. *International Conference on Advances in Construction Materials and Structures*, 65(2), 1908-1914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.160> (in English)

Надійшла до редколегії: 04.08.2022

Прийнята до друку: 09.12.2022