

УДК 624.04:624.078.3:620.179

І. С. Чернов

к. т. н., старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-1006>

Кафедра процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів

Одеська державна академія будівництва та архітектури,

вул. Дідріхсона, 4, Одеса, Україна, 65029

Е. А. Дармофал*

к. т. н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1160-8850>

Кафедра екології та техногенної безпеки

Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут" вул. Вадима

Манька, 17, м. Харків, Україна, 61070.

І. О. Кадикало

к. т. н., старший викладач, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5686-5869>

Кафедра конструювання машин і обладнання

Національний університет біоресурсів і природокористування України вул. Героїв Оборони, 15 м. Київ, Україна, 03041.

*автор-кореспондент, e-mail: elyadarmofal@gmail.com

Методи оцінки технічного стану будівель після екстремальних впливів

Цитувати як: Чернов, І. С., Дармофал, Е. А., Кадикало, І. О. (2026). Методи оцінки технічного стану будівель після екстремальних впливів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 265-283. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-20)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розглянуті методичні підходи до оцінки технічного стану будівель після вибухових та термічних впливів. Запропонована система поєднує польові обстеження, геодезичні вимірювання та лабораторні дослідження матеріалів. Особливу увагу приділено інтеграції даних у єдину розрахункову модель. Дослідження починається з фіксації типів пошкоджень та визначення їхніх геометричних характеристик. На основі отриманих відомостей формується інтегральний індекс структурної пошкоженості. Просторовий моніторинг деформацій здійснюється за допомогою лазерного сканування та тахеометричних зйомок. Матеріали досліджуються комбінованими методами. Враховуються втрати міцності бетону й арматури під впливом високих температур та корозії. Розроблені математичні співвідношення дають змогу розрахувати залишковий розрахунковий опір та коефіцієнт несучої здатності. Параметризована цифрова модель відтворює реальні умови експлуатації. Вона враховує зниження жорсткості, локальні руйнування та ймовірність прогресуючого обвалення. Нелінійний аналіз напруженого стану визначає граничні значення для прийняття рішень. Показники вказують на необхідність підсилення або повної реконструкції. Окремий розділ присвячено прогнозуванню зміни стану конструкцій у часі. Запропонований алгоритм ранжує варіанти відновлення за технічними та

економічними критеріями. Практичне впровадження методики підтвердило її ефективність. Отримані кількісні показники забезпечують обґрунтований вибір між ремонтом та демонтажем. Робота формує наукову основу для безпечної експлуатації пошкоджених об'єктів. Результати можуть бути використані під час розробки нормативних документів та інженерних проєктів відновлення. Дослідження створює підґрунтя для подальшого розвитку теорії оцінки стійкості споруд у складних експлуатаційних умовах. Наукова новизна полягає в систематизації інструментальних даних та їхній адаптації до сучасних розрахункових стандартів. Апробація підходу на реальних об'єктах показала високу збіжність між розрахунковими значеннями та фактичним станом конструкцій.

Ключові слова: технічне обстеження будівель, вибухові пошкодження, залишкова несуча здатність, скінченно-елементне моделювання, прогресуюче обвалення, відновлення конструкцій, попередження ризиків техногенного характеру.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Результати діагностики будівельних конструкцій, що зазнали вибухових навантажень, представлено в науковій публікації Шатова С. В., Богаченка С. В. та Рудіна А. А. [1]. Автори встановили залежність між локальними руйнуваннями перерізів і втратою несучої здатності окремих елементів. Наділі Сергійчук В. А. та співавтори [2] у своєму дослідженні запропонували практичні результати оцінювання житлового будинку, пошкодженого внаслідок військових дій. Вони довели, що поєднання візуального аналізу, розкриття конструкцій та інженерних розрахунків дає змогу достовірно класифікувати технічний стан. Однак питання формалізації інтегральних критеріїв оцінювання залишаються відкритими. У роботі Сергійчука В. А., Яковенка М. М., Нестеренка О. В., Зоріна Є. О. та Бєня І. О. [3] висвітлено результати геодезичного забезпечення обстеження пошкоджених будівель. Автори аналізують застосування лазерного сканування та просторового моніторингу деформацій.

Дослідження Берчуна Я. О., Теличка Р. І. та Клименкова О. А. [4] містить результати застосування алгоритмів штучного інтелекту для автоматизованого розпізнавання пошкоджень. Водночас механізми прогнозування залишкового ресурсу розкрито недостатньо. У публікаціях Кушніра О. та ін. [5], Нужного В. та Колякової В. [6], а також Шеховцова В. та ін. [7] продемонстровано ефективність чисельного моделювання напружено-деформованого стану пошкоджених конструкцій. Масові пошкодження будівель унаслідок вибухів, пожеж та ракетних обстрілів вимагають швидкого й технічно обґрунтованого визначення їхньої залишкової несучої здатності. Наявні підходи часто розглядають окремо польове обстеження, розрахункове моделювання та прогнозування

деградації конструкцій. Це ускладнює прийняття інженерних рішень. Тому актуальним завданням є розроблення інтегрованих методичних підходів визначення стану будівлі за наслідком екстремального тиску.

Мета і завдання дослідження. Мета статті – обґрунтувати методичні підходи оцінювання технічного стану будівель, які зазнали екстремального впливу і мають значні пошкодження.

Завдання дослідження:

– розробити послідовний алгоритм кількісного оцінювання екстремальних пошкоджень;

– сформулювати розрахунково-аналітичний підхід до прогнозування залишкової несучої здатності будівлі.

Матеріали та методи

Емпіричною базою дослідження виступили чинні нормативні акти та матеріали технічних обстежень. Окрему групу утворили відомості неруйнівного контролю. Об'єктами наукового аналізу стали споруди з ознаками вибухового, ударного та термічного пошкодження. Інструментальна діагностика базувалася на візуальному огляді та фотограмметричній фіксації дефектів. Просторове положення несучих елементів контролювали методами тахеометрії та цифрового нівелювання. Внутрішню структуру матеріалів досліджували ультразвуковим прозвучуванням. Механічні властивості визначали шляхом статичного випробування відібраних кернів. Корозійний стан арматури оцінювали за вимірними втратами поперечного перерізу.

Результати та обговорення

Після вибухового ураження або іншого екстремального пошкодження, будівля переходить у стан, який не можна оцінити лише візуально. Частина елементів руйнується миттєво. Інші зберігають геометрію, але втрачають частину жорсткості та несучої здатності. В іншому випадку, ситуація ускладнюється пожежним впливом. Висока температура змінює структуру бетону, знижує межу текучості арматури та прискорює розвиток прихованих дефектів. В результаті інженер має справу з неоднорідною просторовою системою, де кожен конструктивний елемент характеризується власним рівнем пошкоженості [8]. Методика оцінки технічного стану в таких умовах повинна бути послідовною, кількісною та відтворюваною. Вона не обмежується описом тріщин або фотофіксацією руйнувань.

1. Ідентифікація пошкоджень після вибухового та термічного впливу. Перший етап спрямований на визначення характеру руйнувань. Для кожного дефекту встановлюються тип пошкодження, геометричні

параметри, зона поширення, глибина проникнення та потенційний вплив на загальну просторову стійкість будівлі [4]. До аналізу включаються механічні руйнування, пробіони, похилі та нормальні тріщини, відшарування захисного шару, оголення арматури, корозійні ушкодження, термічне розтріскування та локальні обвали (рис. 1). Практика показує, що будівлі після вибуху часто мають комбінований характер пошкоджень.

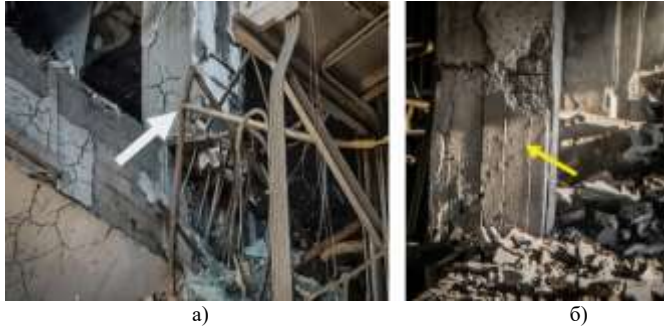


Рис. 1. Характерні пошкодження залізобетонної колони після вибухового впливу: а – локальне руйнування перерізу з горизонтальним зміщенням осі колони на 300 мм, з випучуванням поздовжньої арматури та повним оголенням стрижнів; б – система вертикальних і похилих тріщин з розкриттям у зоні максимальних згинальних деформацій.

Наприклад, ударна хвиля формує миттєві імпульсні навантаження, уламки викликають локальні пробіони, а подальша пожежа знижує характеристики матеріалів [9]. Для стандартизації первинного аналізу використовується методична матриця, наведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Класифікація пошкоджень після вибухів, пожеж та ракетних обстрілів

№ з/п	Вид пошкодження	Основний параметр оцінки	Коефіцієнт структурного впливу	Типова причина	Ризик прогресуючого руйнування, %
1	Волосні тріщини	Ширина 0,1-0,3 мм	0,05	Усадка, локальний удар	1
2	Наскрізні тріщини	Ширина 1,0-3,0 мм	0,18	Ударна хвиля	8
3	Похилі тріщини в діафрагмах	Довжина понад 1,5 м	0,32	Перерозподіл зусиль	18

4	Відшарування бетону	Глибина 20-60 мм	0,24	Вибуховий імпульс	12
5	Оголення арматури	Довжина понад 0,5 м	0,39	Сколювання бетону	21
6	Термічна деградація бетону	Температура понад 500 °С	0,46	Пожежа після вибуху	27
7	Корозія арматури	Втрата перерізу понад 10 %	0,41	Вологісний вплив	19
8	Руйнування вузла	Часткова втрата перерізу	0,74	Вибухове перевантаження	63
9	Часткове обвалення перекриття	Площа понад 20 м ²	0,88	Локальна втрата опори	84

Кожному пошкодженню присвоюється числовий код. Після цього обчислюється інтегральний індекс пошкоженості [3]:

$$D_{str} = 1 - \prod_{i=1}^n \left[1 - (w_i \alpha_i^{\beta_i} \gamma_i \delta_i \eta_i) \right] \quad (1)$$

де D_{str} – інтегральний індекс структурної пошкоженості будівлі;

w_i – ваговий коефіцієнт значущості i -го дефекту;

α_i – відносна втрата жорсткості елемента;

β_i – показник нелінійності впливу дефекту;

γ_i – коефіцієнт просторового поширення пошкодження;

δ_i – коефіцієнт динамічного впливу ударної хвилі;

η_i – коефіцієнт взаємодії з суміжними дефектами;

n – кількість зафіксованих пошкоджень.

При значенні D_{str} понад 0,60 будівля класифікується як аварійна.

2. Методика геодезичного та деформаційного контролю. Після кодування пошкоджень визначаються фактичні геометричні зміни конструктивної системи. На цьому етапі застосовують тахеометрію, цифрове нівелювання, лазерне сканування, фотограмметрію та інклінометричний контроль. Методика передбачає побудову опорної геодезичної мережі, прив'язку контрольних точок та формування тривимірної хмари точок [10]. На основі отриманих координат визначаються прогини плит, крени колон, осідання фундаментів, зміщення діафрагм та деформації вузлів. Увагу приділяють будівлям, у яких вибух спричинив втрату окремих вертикальних елементів. У таких випадках

навіть невеликі додаткові переміщення можуть означати розвиток прогресуючого руйнування (рис. 2) [11].



Рис. 2. Схема просторового розташування пошкоджень і зон деформацій на фасаді будівлі

Результати геометричного моніторингу узагальнюються в аналітичній таблиці (табл. 2).

Таблиця 2. Регламент геодезичного та деформаційного контролю пошкоджених будівель

№ з/п	Контрольований параметр	Метод вимірювання	Типова точність	Критичне значення	Інженерна інтерпретація
1	Відхилення колон від вертикалі	Тахеометрія	± 1 мм	> 12 мм	Втрата стійкості
2	Осідання фундаментів	Нівелювання	$\pm 0,3$ мм	> 10 мм	Нерівномірна робота основи
3	Прогини плит	Лазерне сканування	± 2 мм	$> 1/250$	Зниження жорсткості
4	Повороти ригелів	Інклінометри	$\pm 0,0001$ рад	$> 0,002$ рад	Перевантаження вузла

5	Розкриття тріщин	Електронний тріщиномір	±0,02 мм	> 0,4 мм	Активний розвиток дефекту
6	Просторові зміщення	3D-сканування	±3 мм	> 15 мм	Порушення геометрії секції
7	Крен секції	Геодезичний аналіз	±1 мм	> Н/500	Системна нестійкість
8	Деформації зон обвалення	Фотограмметрія	±5 мм	Будь-яке збільшення	Активне руйнування
9	Температурні деформації	Тепловізія	±2 °С	> 80 °С	Залишковий нагрів

В подібних випадках пропонується використовувати розрахунковий Коефіцієнт геометричної стабільності просторової системи:

$$K_{geo} = \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\delta_{adm,j}}{\delta_{fact,j}} \right)^{q_j} \right] \cdot \left(\frac{1}{1 + \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j \theta_j^2}} \right) \quad (2)$$

де K_{geo} – коефіцієнт геометричної стабільності;

$\delta_{adm,j}$ – допустиме значення j -го параметра;

$\delta_{fact,j}$ – фактичне значення параметра;

q_j – показник значущості параметра;

ω_j – ваговий коефіцієнт впливу повороту;

θ_j – кут повороту або перекосу елемента;

m – кількість контрольованих геометричних параметрів.

У випадках, коли $K_{geo} < 1,0$, то геометрична стабільність будівлі не забезпечена.

3. Методика визначення фактичних фізико-механічних характеристик матеріалів. Після екстремальних впливів будівельні матеріали втрачають однорідність. Бетон зазнає мікротріщиноутворення, арматура частково відпускається, кладка деградує через руйнування швів. Через це використання проектних характеристик стає некоректним. Методика передбачає поєднання неруйнівного контролю та лабораторних випробувань (табл. 3).

Таблиця 3. Процес визначення залишкових характеристик матеріалів

№ з/п	Матеріал	Показник	Метод визначення	Мінімальна вибірка	Параметр оцінювання	Типовий діапазон редукції
1	Бетон	Міцність на стиск	Керни ультразвуковий	6 зразків	$R_{c,res}$	0,40-0,95
2	Бетон	Модуль пружності	Лабораторні випробування	3 зразки	$E_{c,res}$	0,45-0,90
3	Арматура	Межа текучості	Вирізки та аналіз	3 зразки	$R_{s,res}$	0,75-0,95
4	Арматура	Втрата площі	Геометричний контроль	20 точок	$A_{s,res}$	0,80-1,00
5	Цегла	Міцність на стиск	Пресові випробування	5 зразків	$R_{m,res}$	0,50-0,90
6	Розчин	Міцність	Кубикові зразки	6 зразків	$R_{mort,res}$	0,50-0,85
7	Сталь підсилення	Межа текучості	Твердомір	10 точок	$R_{y,res}$	0,80-0,98
8	Захисний шар	Товщина	Магнітний прилад	30 точок	c_{fact}	Без редукції
9	Корозія	Потенціал	Електрохімічний метод	20 точок	Індекс корозії	Якісна оцінка

Для узагальнення результатів використовується залишковий розрахунковий опір матеріалу після вибуху та пожежі:

$$R_{res} = R_0 \left(\prod_{j=1}^m k_j \right) \exp \left[-\lambda_1 \left(\frac{T_{max} - T_0}{T_{cr} - T_0} \right)^{p_1} - \lambda_2 \left(\frac{\Delta A_s}{A_{s0}} \right)^{p_2} - \lambda_3 \left(\frac{w_{cr}}{w_{lim}} \right)^{p_3} \right] \quad (3)$$

де R_{res} – залишковий розрахунковий опір матеріалу;

R_0 – початковий нормативний опір;

k_j – коригувальні коефіцієнти технологічних та експлуатаційних чинників;

T_{max} – максимальна температура нагріву;

T_0 – початкова температура;

T_{cr} – критична температура деградації;

ΔA_s – втрата площі арматури;

A_{s0} – початкова площа арматури;

w_{cr} – фактична ширина розкриття тріщин;

w_{lim} – гранично допустима ширина тріщин;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – параметри чутливості;

p_1, p_2, p_3 – показники степеневі залежності.

4. Методика інтегрального оцінювання залишкової несучої здатності. Заключний етап полягає в інтеграції всіх отриманих параметрів. Дані про пошкодження, деформації та властивості матеріалів об'єднуються в єдину систему показників. На її основі визначається коефіцієнт залишкової несучої здатності [5].

$$\eta_R = \frac{\sum_{k=1}^s [N_{u,k}^{res} \phi_k \psi_k]}{\sum_{k=1}^s [N_{Ed,k} \chi_k]} \cdot (1 - D_{str})^\mu \cdot K_{geo}^v \quad (4)$$

де η_R – узагальнений коефіцієнт залишкової несучої здатності будівлі;

$N_{u,k}^{res}$ – залишкова гранична здатність k -го елемента;

$N_{Ed,k}$ – розрахункове навантаження на елемент;

ϕ_k – коефіцієнт конструктивного резерву;

ψ_k – коефіцієнт перерозподілу зусиль;

χ_k – коефіцієнт динамічного збільшення навантаження;

D_{str} – інтегральний індекс пошкоженості;

K_{geo} – коефіцієнт геометричної стабільності;

μ, v – параметри чутливості системи;

s – кількість розрахункових елементів.

Якщо $\eta_R \geq 1,0$, конструктивна система забезпечує нормативну надійність. При значеннях від 0,75 до 1,0 потрібне підсилення. Якщо показник менший за 0,75, будівля потребує негайних протиаварійних заходів, часткового демонтажу або повної реконструкції.

Цифрове моделювання починається з формування геометричної основи. До моделі імпортуються результати лазерного сканування, координати контрольних точок, контури фактичних руйнувань та карти пошкоджень. Для кожної колони, ригеля, діафрагми та плити задаються індивідуальні характеристики матеріалу. Частина елементів отримує редуковані модулі пружності, інші виключаються повністю [12, 13]. Для інтегральної оцінки редукованої жорсткості конструктивного елемента застосовується така залежність:

$$K_e^* = \frac{E_{b,res} I_{b,res} + \sum_{j=1}^m E_{s,j} A_{s,j} z_j^2}{E_{b,0} I_{b,0} + \sum_{j=1}^m E_{s,j}^0 A_{s,j}^0 z_j^2} \cdot \exp \left[-\alpha_T \left(\frac{T_{max}}{T_{cr}} \right)^{p_1} - \alpha_c \left(\frac{\Delta A_s}{A_{s,0}} \right)^{p_2} - \alpha_w \left(\frac{w_{cr}}{w_{lim}} \right)^{p_3} \right] \quad (5)$$

де K_e^* – коефіцієнт залишкової жорсткості елемента;

$E_{b,res}$ – фактичний модуль пружності бетону;

$I_{b,res}$ – фактичний момент інерції бетонного перерізу;

$E_{s,j}$ – модуль пружності j -го арматурного стрижня;

$A_{s,j}$ – фактична площа арматури;

z_j – відстань від стрижня до нейтральної осі;

$E_{b,0}$ – початкові проектні характеристики;

T_{max} – максимальна температура нагріву;
 T_{cr} – критична температура деградації;
 ΔA_s – втрата площі арматури;
 w_{cr} – фактичне розкриття тріщин;
 w_{lim} – граничне допустиме розкриття;
 $\alpha_T, \alpha_C, \alpha_w$ – коефіцієнти чутливості.

Як видається, саме цей показник найкраще передає реальний ступінь послаблення конструкції. У розрахунках для пошкоджених колон коефіцієнт K_e^* коливався від 0,28 до 0,74. Тобто окремі елементи втратили понад 70 % початкової жорсткості. Після редукції параметрів створюється тривимірна скінченно-елементна модель. Для багатоповерхових житлових будинків типова модель містить від 180 до 450 тис. вузлів (табл. 4).

Таблиця 4. Параметричне наповнення цифрової FEM-моделі пошкодженої будівлі

№ з/п	Параметр моделі	Джерело даних	Типова кількість значень	Діапазон зміни	Спосіб урахування
1	Геометрія елементів	Лазерне сканування	10^5 – 10^6 координат	Фактична	Імпорт CAD-моделі
2	Модулі пружності	Лабораторні випробування	50–300	8–32 ГПа	Індивідуально
3	Втрата арматури	Розкриття конструкцій	100–500 точок	0–25 %	Редукція площ
4	Температурні зони	Тепловізія та експертиза	10–40 зон	20–900 °C	Коефіцієнти деградації
5	Тріщини	Карти дефектів	200–2000	0,1–8,0 мм	Зниження жорсткості
6	Демонтовані елементи	Польове обстеження	1–50	Повна втрата	Видалення з моделі
7	Тимчасові підпори	Проект стабілізації	5–100	Фактична жорсткість	Додаткові елементи
8	Імпульсні навантаження	Аналіз вибуху	10–100 сценаріїв	50–500 кПа	Динамічний розрахунок
9	Повторні експлуатаційні навантаження	Нормативні дані	Повний набір	Стандартні	Комбінації навантажень

У реальних розрахунках фіксуються не лише максимальні напруження. Аналізується карта пластичних деформацій, зміни жорсткості

по поверххах, послідовність руйнування вузлів та темпи зростання переміщень [14]. Для монолітних будівель особливо небезпечними виявляються локальні концентрації зусиль у вузлах сполучення колон і плит, де напруження можуть перевищувати середній рівень у 2,5-4,0 рази (рис. 3.).



Рис. 3. Характерні пошкодження плит перекриття та вертикальних елементів каркаса після вибухового та ударного навантаження

Для інтегрального оцінювання залишкової несучої здатності просторової системи застосовується така багатофакторна залежність:

$$\eta_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{u,i}^{res} \phi_i \psi_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n (S_{Ed,i} \chi_i)} \cdot \left(\prod_{k=1}^m K_{e,k}^* \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \exp \left[-\beta_1 D_p - \beta_2 \frac{\sum V_{pl}}{V_{tot}} - \beta_3 P_{col} \right] \quad (6)$$

де η_{sys} – інтегральний коефіцієнт залишкової несучої здатності будівлі;

$R_{u,i}^{res}$ – залишкова гранична здатність i -го елемента;

$S_{Ed,i}$ – розрахункове зусилля в елементі;

ϕ_i – коефіцієнт конструктивного резерву;

ψ_i – коефіцієнт перерозподілу навантажень;

ω_i – коефіцієнт дублювання силових шляхів;

χ_i – коефіцієнт динамічного збільшення зусиль;

$K_{e,k}^*$ – коефіцієнт залишкової жорсткості k -го елемента;

D_p – інтегральний індекс пошкоженості;

$\sum V_{pl}/V_{tot}$ – частка пластично деформованого об'єму;

P_{col} – імовірність прогресуючого обвалення;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – параметри чутливості.

При η_{sys} нижче 0,85 експлуатація без підсилення вважається недопустимою. Значення менше 0,60 означає, що конструктивна система втратила достатній запас надійності [15]. Для пошкоджених будівель найбільшу практичну цінність мають три цифрові модулі. Перший модуль автоматично розпізнає тріщини, зони обвалення та ділянки термічного руйнування на основі фотограмметричних даних. Другий модуль прогнозує зміну характеристик матеріалів у часі. Третій модуль ранжує сценарії відновлення з урахуванням технічних, часових та економічних критеріїв. Для прогнозування технічного стану через заданий часовий інтервал застосовується багатопараметрична модель деградації:

$$I_t = I_0 \cdot \exp \left[- \int_0^t (\lambda_T T(\tau)^{a_1} + \lambda_H H(\tau)^{a_2} + \lambda_C C(\tau)^{a_3} + \lambda_S S(\tau)^{a_4}) d\tau \right] \cdot (1 - \rho_{rep})^\mu \quad (7)$$

де I_t – прогнозний індекс технічного стану на момент часу t ;

I_0 – початковий індекс технічного стану після обстеження;

$T(\tau)$ – температурний вплив у момент часу τ ;

$H(\tau)$ – вологісний вплив;

$C(\tau)$ – корозійний фактор;

$S(\tau)$ – повторні експлуатаційні навантаження;

$\lambda_T, \lambda_H, \lambda_C, \lambda_S$ – коефіцієнти деградації;

a_1, a_2, a_3, a_4 – показники нелінійності;

ρ_{rep} – частка відновленого конструктивного ресурсу;

μ – коефіцієнт ефективності ремонтних заходів.

За допомогою наведеної моделі визначають строки повторного обстеження та прогнозують момент, коли конструкція досягне критичного стану. Для будівель із локальними пошкодженнями індекс технічного стану часто знижується на 3-5 % щороку. Для конструкцій, що зазнали одночасно вибухового та пожежного впливу, темп деградації може бути втричі вищим. Результати цифрового прогнозування зручно подавати у вигляді порівняльної матриці сценаріїв (табл. 5).

Таблиця 5. Автоматизоване ранжування сценаріїв відновлення пошкодженої будівлі

№ з/п	Сценарій відновлення	Коефіцієнт залишкової здатності після робіт	Прогнозний строк служби, років	Тривалість реалізації, діб	Відносні витрати	Підсумковий рейтинг
1	Локальний ремонт тріщин	0,84	8	18	0,22	0,54

2	Підсилення колон композитами	1,03	22	34	0,48	0,86
3	Влаштування сталевих обойм	1,08	28	41	0,62	0,91
4	Заміна пошкоджених плит	1,11	30	57	0,74	0,89
5	Комбіноване підсилення	1,19	40	63	0,88	0,97
6	Частковий демонтаж секції	1,00	25	95	1,12	0,72
7	Повна реконструкція	1,26	50	180	1,85	0,83
8	Повний демонтаж і нове будівництво	1,35	75	320	3,40	0,79

Як видно з таблиці 5, комбіноване підсилення часто забезпечує найкраще співвідношення між технічним результатом і витратами. Воно включає заміну критичних елементів, підсилення колон, ін'єктування тріщин і відновлення просторової жорсткості діафрагм. Для остаточного вибору технічного рішення використовується інтегральний критерій ефективності:

$$E_{opt} = \omega_1 \eta_{sys} + \omega_2 \frac{L_{pred}}{L_{max}} + \omega_3 \left(1 - \frac{C_i}{C_{max}} \right) + \omega_4 \left(1 - \frac{T_i}{T_{max}} \right) + \omega_5 (1 - P_{col}) \quad (8)$$

де E_{opt} – інтегральний критерій ефективності варіанта відновлення;

η_{sys} – коефіцієнт залишкової несучої здатності після робіт;

L_{pred} – прогнозний строк подальшої експлуатації;

L_{max} – максимальний строк серед розглянутих варіантів;

C_i – вартість i -го варіанта;

C_{max} – найбільша вартість;

T_i – тривалість реалізації;

T_{max} – найбільша тривалість;

P_{col} – імовірність прогресуючого обвалення;

$\omega_1 \dots \omega_5$ – вагові коефіцієнти критеріїв.

Сценарій з найбільшим значенням E_{opt} приймається як пріоритетний. Представлений методичний підхід формує завершений інженерний цикл. Спочатку створюється параметризована цифрова модель з урахуванням фактичних пошкоджень. Далі виконується нелінійний аналіз напружено-деформованого стану та визначається коефіцієнт залишкової несучої здатності. У підсумку, експерт отримує не окремі розрахунки, а цілісну систему кількісно обґрунтованих показників, достатню для вибору оптимального рішення щодо ремонту, підсилення, реконструкції або демонтажу пошкодженої будівлі (частин будівлі).

Висновки

Інтеграція фотофіксації, лазерного сканування, геодезичного контролю, неруйнівних випробувань і лабораторних досліджень властивостей бетону та арматури формує узгоджену систему вихідних параметрів для подальшого чисельного аналізу. Результати практичних розрахунків засвідчують, що падіння модуля пружності бетону в межах від 45 до 60 відсотків разом із втратою площі арматурного перерізу, що перевищує 15%, знижує локальну жорсткість окремих елементів до рівня від 0,30 до 0,70 від номінального проектного значення.

Розрахунковий алгоритм ґрунтується на нелінійному скінченно-елементному моделюванні, яке відтворює наявні дефекти, наслідки температурного впливу та виключає з розрахункової схеми зруйновані ділянки. Така постановка задачі дозволяє точно локалізувати зони концентрації напружень, оцінити частку пластичних деформацій та визначити коефіцієнт залишкової несучої здатності всієї конструктивної системи. Так зниження коефіцієнта залишкової несучої здатності нижче значення 0,85 вказує на обов'язкову потребу в конструктивному підсиленні, тоді як показник менший за 0,60 свідчить про доцільність часткового демонтажу або комплексної реконструкції.

Розроблений інструмент цифрового прогнозування супроводжується багатокритеріальним ранжуванням сценаріїв відновлення, у якому зіставляються залишкова несуча здатність, очікуваний строк експлуатації, строки виконання робіт, фінансові витрати та ризик розвитку прогресуючого обвалення. Апробація методики на реальних об'єктах засвідчила, що комплексне підсилення колон, плит перекриття та вертикальних діафрагм дозволяє підвищити коефіцієнт несучої здатності до рівня від 1,15 до 1,20 і гарантує прогнозний експлуатаційний ресурс не менше 35 років.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший,

який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

(Або вказати офіційні вихідні дані теми державної науково-дослідної роботи, гранту тощо)

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

References

1. Shatov, S. V., Bohachenko, S. V., & Rudin, A. A. (2023). Diahnostyka tekhnichnoho stanu budivelnnykh konstruksii, yaki zaznaly neproiektnykh vplyviv vybukhovoho kharakteru. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, 2(14), 100–110. <http://dx.doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.100.937>

2. Serhiichuk, V. A., Tabarkevych, N. V., Bielokon, A. M., & Tabarkevych, O. O. (2023). Osoblyvosti obstezhennia ta otsinky tekhnichnoho stanu zhytloвого budynku, poskodzhenoho vnaslidok viiskovykh dii, shchodo yoho prydatnosti do podalshoi ekspluatatsii. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 1, 4–13. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-4>

3. Serhiichuk, V. A., Yakovenko, M. M., Nesterenko, O. V., Zorin, Ye. O., & Ben, I. O. (2024). Heo8. dezynchne zabezpechennia kompleksu robiz z obstezhennia budivel, shcho postrazhdaly vnaslidok viiskovykh dii na prykladi ZhK "Dynastiia" v m. Kyievi. *Nauka ta budivnytstvo*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-1>

4. Berchun, Ya. O., Telychko, R. I., & Klymenkov, O. A. (2025). Otsinka zminy tekhnichnoho stanu ponivechenykh bahatopoverkhovykh budivel za dopomohoiu shtuchnoho intelektu. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 2, 185–198. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>

5. Kushnir, O., Kushnir, V., Grynyova, I., & Bichev, I. (2025). Investigation of the stress-strain state of building structures damaged by emergency situation. *Modern Construction and Architecture*, 12, 65–80. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-12-65-80>

6. Nuzhnyi, V., & Koliakova, V. (2025). Analysis of some cases residential buildings destruction as a result of combat actions. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 17, 189–199. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.17.2025.189-199>

7. Shekhovtsov, V., Fesenko, O., Malakhov, V., & Dmytrenko, Y. (2025). Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 16, 135–144. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>

8. Berezovskyi, A. V., Dzhulai, O. A., Rudeshko, I. V., Chornomaz, I. V., & Vykhrystenko, V. V. (2024). Osoblyvosti tekhnichnoho obstezhennia budivel i sporud, shcho byly poshkodzeni abo zruinovani vnaslidok viiskovykh dii. *Nadzvychnaini sytuatsii: Poperedzhennia ta likvidatsiia*, 8(2), 5–14. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.5.14>

9. Melashenko, Yu. B., Sliusarenko, Yu. S., Ishchenko, Yu. V., & Pavliuk, Ye. M. (2023). Dosvid obstezhennia panelnykh budynkiv, poshkodzenykh vnaslidok boiovykh dii. *Nauka ta budivnytstvo*, 36(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>

10. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunenko, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

11. Donets, T. (2024). Kharakterystyka poshkodzen budivel z riznymy konstruktivnymi systemamy vnaslidok voiennykh dii. *Nauka ta budivnytstvo*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-6>

12. DBN V.2.2-5:2023. (2023). Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3189167248606157714/2023-11-01/56d2692b-4667-4ca8-a06c-a4fdb13f9fce.pdf

13. Semko, O., Vynnykov, Y., Filonenko, O., Yurin, O., Ilchenko, T., Hranko, O., Semko, V., Salles, A., Mateus, R., & Mahas, N. (2025). Perspectives of industrialized construction for post-war housing recovery and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 17(5), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/su17052264>

14. Farenjuk, H. H., Zelenko, Ye. V., & Sliusarenko, Yu. S. (2025). Perspektyvy industrialnoho budivnytstva dlia vidnovlennia zhytla, zruinovanoho vnaslidok viiskovoi ahresii. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-1>

15. DSTU 9273:2024. (2024). Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsiniuvannia yikhnoho tekhnichnoho stanu. *Mekhanichnyi opir ta stiikist. DP "UkrNDNTs"*. https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_9273_2024.pdf

Література

1. Шатов, С. В., Богаченко, С. В., & Рудін, А. А. (2023). Діагностика технічного стану будівельних конструкцій, які зазнали непроєктних впливів вибухового характеру. *Український журнал будівництва та архітектури*, 2(14), 100–110. <http://dx.doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.100.937>

2. Сергійчук, В. А., Табаркевич, Н. В., Белоконь, А. М., & Табаркевич, О. О. (2023). Особливості обстеження та оцінки технічного стану житлового будинку, пошкодженого внаслідок військових дій, щодо його придатності до подальшої

експлуатації. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1, 4–13. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-4>

3. Сергійчук, В. А., Яковенко, М. М., Нестеренко, О. В., Зорін, Є. О., & Бень, І. О. (2024). Геодезичне забезпечення комплексу робіт з обстеження будівель, що постраждали внаслідок військових дій на прикладі ЖК «Династія» в м. Києві. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-1>

4. Берчун, Я. О., Теличко, Р. І., & Клименков, О. А. (2025). Оцінка зміни технічного стану понівечених багатоповерхових будівель за допомогою штучного інтелекту. *Містобудування та територіальне планування*, 2, 185–198. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>

5. Kushnir, O., Kushnir, V., Grynyova, I., & Bichev, I. (2025). Investigation of the stress-strain state of building structures damaged by emergency situation. *Modern Construction and Architecture*, 12, 65–80. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2025-12-65-80>

6. Nuzhnyi, V., & Koliakova, V. (2025). Analysis of some cases residential buildings destruction as a result of combat actions. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 17, 189–199. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.17.2025.189-199>

7. Shekhovtsov, V., Fesenko, O., Malakhov, V., & Dmytrenko, Y. (2025). Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 16, 135–144. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>

8. Березовський, А. В., Джулай, О. А., Рудешко, І. В., Чорномаз, І. В., & Вихристенко, В. В. (2024). Особливості технічного обстеження будівель і споруд, що були пошкоджені або зруйновані внаслідок військових дій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 8(2), 5–14. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.5.14>

9. Мелашенко, Ю. Б., Слюсаренко, Ю. С., Іщенко, Ю. В., & Павлюк, Є. М. (2023). Досвід обстеження панельних будинків, пошкоджених внаслідок бойових дій. *Наука та будівництво*, 36(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-5>

10. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

11. Донець, Т. (2024). Характеристика пошкоджень будівель з різними конструктивними системами внаслідок воєнних дій. *Наука та будівництво*, 40(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2024-6>

12. ДБН В.2.2-5:2023. (2023). Захисні споруди цивільного захисту. *Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України*. https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3189167248606157714/2023-11-01/56d2692b-4667-4ca8-a06c-a4fdb13f9fce.pdf

13. Semko, O., Vynnykov, Y., Filonenko, O., Yurin, O., Ilchenko, T., Hranko, O., Semko, V., Salles, A., Mateus, R., & Mahas, N. (2025). Perspectives of industrialized

construction for post-war housing recovery and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 17(5), Article 2264. <https://doi.org/10.3390/su17052264>

14. Фаренюк, Г. Г., Зеленко, Є. В., & Слюсаренко, Ю. С. (2025). Перспективи індустріального будівництва для відновлення житла, зруйнованого внаслідок військової агресії. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1, 1–11. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2025-1>

15. ДСТУ 9273:2024. (2024). Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. ДП «УкрНДНЦ».

https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_9273_2024.pdf

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 15.05.2026	Received 15.05.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 19.05.2026	Received in revised form 19.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

I. S. Chernov

Ph.D. in Technical Sc., Senior Lecturer ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-1006>
Department of Processes and Apparatuses for Construction Materials Production,
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
4 Didrikhsona St, Odesa, Ukraine, 65029

E. A. Darmofal*

Ph.D. in Technical Sc., Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1160-8850>
Department of Ecology and Technogenic Safety
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
17 Vadymo Manka St, Kharkiv, Ukraine, 61070

I. O. Kadykalo

Ph.D. in Technical Sc., Senior Lecturer, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5686-5869>
Department of Machine and Equipment Design
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
15 Heroiv Oborony St, Kyiv, Ukraine, 03041

*corresponding author, e-mail: elyadarmofal@gmail.com

Methods for Assessing the Technical Condition of Buildings after Extreme Impacts

How to Cite: Chernov, I. S., Darmofal, E. A., & Kadykalo, I. O. (2026). Methods for assessing the technical condition of buildings after extreme impacts. *Modern Technologies and Calculation Methods in Construction*, 25, 265-283. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-20](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-20)

Abstract. The article examines methodological approaches to assessing the technical condition of buildings after blast and thermal impacts. The proposed system combines field inspections, geodetic measurements, and laboratory testing of materials. Special attention is given to integrating the collected data into a unified computational model. The study begins with identifying damage types and determining their geometric

characteristics. Based on the obtained information, an integral structural damage index is formed. Spatial monitoring of deformations is carried out using laser scanning and tachometric surveys. Materials are investigated using combined methods. Reductions in the strength of concrete and reinforcement caused by high temperatures and corrosion are taken into account. The developed mathematical relationships make it possible to calculate the residual design resistance and the load-bearing capacity coefficient. The parameterized digital model reproduces actual service conditions. It accounts for stiffness reduction, local failures, and the probability of progressive collapse. Nonlinear stress analysis determines threshold values for engineering decision-making. The resulting indicators identify the need for strengthening or complete reconstruction. A separate section is devoted to forecasting changes in the condition of structures over time. The proposed algorithm ranks recovery options according to technical and economic criteria. Practical implementation of the methodology confirmed its effectiveness. The obtained quantitative indicators provide a substantiated choice between repair and demolition. The study forms a scientific basis for the safe operation of damaged facilities. The results can be used in the development of regulatory documents and engineering recovery projects. The research establishes a foundation for the further development of the theory of structural stability assessment under complex service conditions. The scientific novelty lies in the systematization of instrumental data and their adaptation to modern computational standards. Validation of the approach on real facilities demonstrated a high level of agreement between calculated values and the actual condition of structural elements.

Keywords: technical inspection of buildings, blast damage, residual load-bearing capacity, finite element modeling, progressive collapse, structural rehabilitation, prevention of man-made risks.