

Ю.І. КАЛЮХ

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна, e-mail: kalyukh2002@gmail.com.

В.А. ДУНІН

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ, Україна, e-mail: vladimirdunin87@gmail.com.

М.Г. МАР'ЄНКОВ

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ, Україна, e-mail: maryenkov2019@gmail.com.

О.М. ТРОФИМЧУК

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна, e-mail: Trofymchuk@nas.gov.ua.

С.Ю. КУРАШ

ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ, Україна, e-mail: Zuvs2004@gmail.com.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ РИЗИКУ ТА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕСУРСУ БУДІВЕЛЬ У ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ

Анотація. Розглянуто особливості застосування теорії ризику та чисельного моделювання для визначення ресурсу будівель у зоні бойових дій. Надано кількісну комплексну оцінку зниження ресурсу будівель, що зазнали руйнувань. Розроблено комплексну прикладну методику визначення залишкового ресурсу будівель в зоні бойових дій. Побудовано графічну модель будівлі з урахуванням результатів візуального обстеження. Здійснено розрахунки динаміки напружено-деформованого стану будівлі. Оцінено ризики руйнування конструкцій будівлі та побудовано криву її життєвого циклу.

Ключові слова: математичне моделювання, напружено-деформований стан, ризик, бойові динамічні впливи, життєвий ресурс.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Системний аналіз динамічних впливів промислових вибухів на житлову забудову, проблеми динамічної паспортизації будівель і споруд, а також чисельні методи математичного моделювання для обчислення складних задач механіки досліджувалися багатьма вченими [1–22]. Так, у роботі [23] розглянуто зниження життєвого ресурсу будівлі Центру дитячої творчості (м. Кривий Ріг), що зазнала динамічних впливів від ґрунтових та повітряних ударних хвиль унаслідок регулярних промислових вибухів, які є одним з елементів технологічного циклу видобутку залізняку у залізрудних кар'єрах. У роботі [24] досліджено питання динамічних впливів повітряних і ґрунтових ударних хвиль від промислових вибухів на всіх кар'єрах Кривого Рогу на різні типи будівель цивільної забудови, які розташовані на межі охоронних зон прилеглих кар'єрів залізняку. У [25] на основі програмного комплексу (ПК) ЛІРА САПР-2021 [26] розроблено ПК Ліра-cluster. З використанням ПК Ліра-cluster отримано результати апробації гібридних алгоритмів для розв'язування задач статичного аналізу міцності декількох будівельних об'єктів і окремих їхніх конструкцій, зокрема для 27-поверхового будинку в м. Києві (далі будинку-27). У 2022 р. проблема системного оцінювання динамічних впливів на цивільну та промислову забудову в Україні набула особливої гостроти у зв'язку із воєнними діями. За таких умов для математичного моделювання у графічній моделі будівлі потрібно вилучати конструкції, які були зруйно-

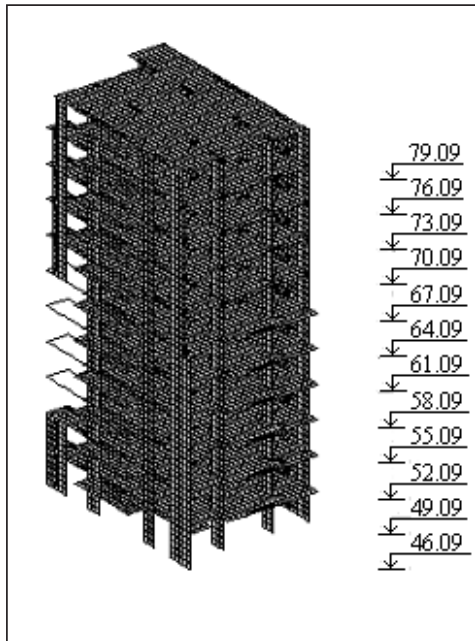


Рис. 1. Комп'ютерна модель фрагменту будівлі (будинок-27) з елементами ушкоджень в межах 18–21-го поверхів

вані внаслідок влучання ракет, снарядів, мін тощо (рис. 1) [27–30].

Розглянемо такі три типи руйнувань: будівля повністю зруйнована та відновленню не підлягає; будівля частково зруйнована та підлягає відновленню; будівля зовні виглядає непошкодженою, але розташована в зоні бойових дій і зазнавала динамічних впливів. У другому та третьому випадках потрібно враховувати вплив ґрунтових і повітряних ударних хвиль (динамічні впливи) на технічний стан будівлі та кількісно оцінити зниження її життєвого ресурсу. Життєвий цикл будь-якої будівлі від початку введення її в експлуатацію до знесення графічно відображено на рис. 2 (згідно з документом fib [31]). У розглядуваному випадку (вплив ґрунтових і повітряних ударних хвиль, часткове руйнування конструкцій) рис. 2 трансформується у рис. 3. Крива життєвого циклу будівлі

має розрив першого роду внаслідок динамічних впливів воєнних дій (див. рис. 3).

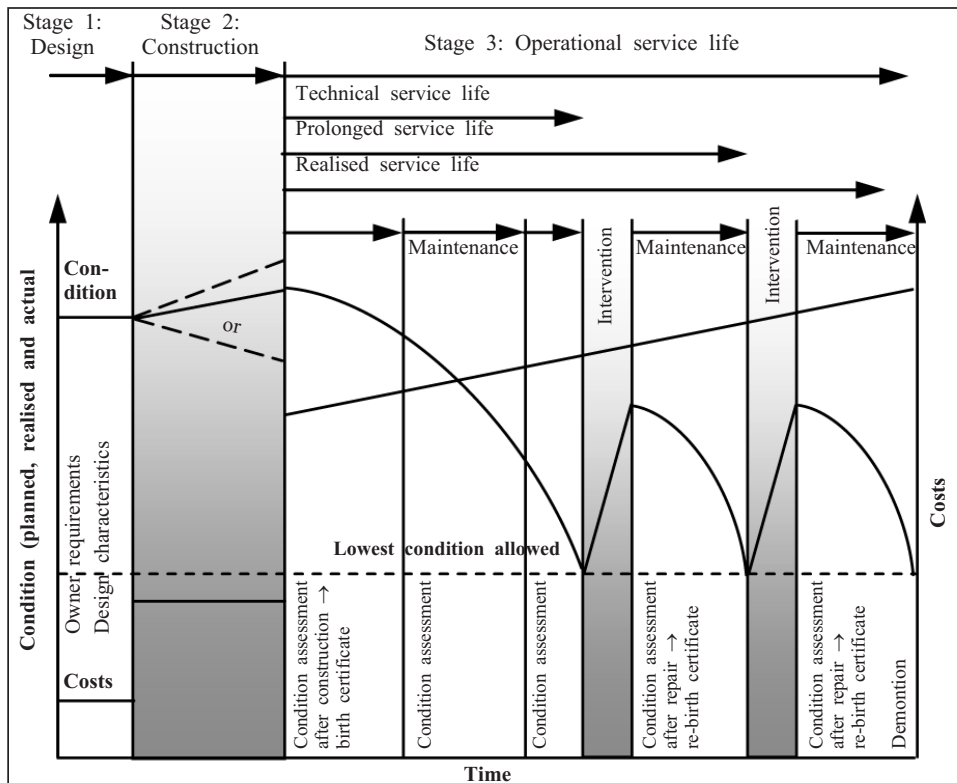


Рис. 2. Повний життєвий цикл будівлі від «народження» до «смерті» [31]

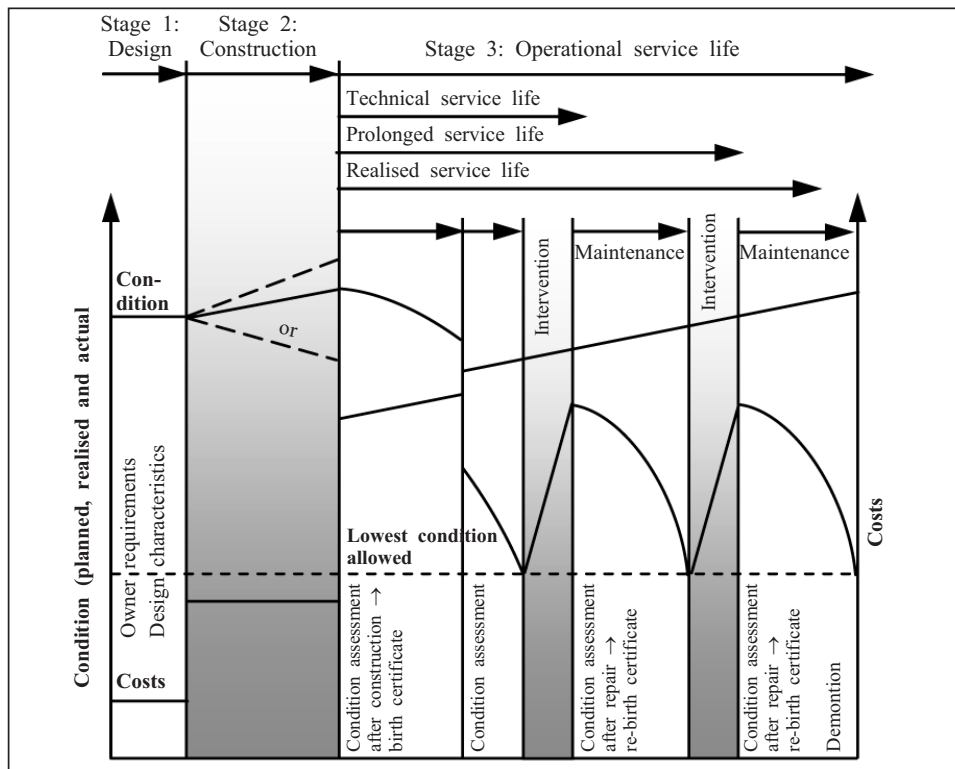


Рис. 3. Скорочений життєвий цикл будівлі від «народження» до «смерті» внаслідок динамічних впливів воєнних дій (модифікований графік [31])

Відповідно до будівельних норм України термін експлуатації будівель оцінюється у 100 років [32]. Обов'язковим є розв'язання таких завдань.

1. Як оцінювати поточний вік будівлі з урахуванням часткових руйнувань та (або) динамічних впливів?

2. Як оцінювати залишковий ресурс будівлі та заподіяні економічні збитки внаслідок бойових дій протягом певного часу (навіть за умов зовнішньої цілісності)?

Отже, метою статті є розроблення методології комплексного кількісного оцінювання зниження ресурсу будівель, що зазнали динамічного впливу внаслідок бойових дій.

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БУДІВЛІ

Чисельні дослідження вимушених коливань будівель унаслідок бойових дій, описаних просторовими багатомасовими лінійними розрахунковими динамічними моделями, виконано з використанням програмного комплексу ЛІРА САПР-2021, де реалізовано метод скінченних елементів [26]. Обчислення динамічних впливів (різної інтенсивності, за якої будівельні конструкції перебувають у пружній стадії) в ПК ЛІРА САПР-2021 [26] виконувалися на базі скінченноелементної просторової моделі будівлі (рис. 4) з використанням системи диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами вигляду

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_0(t)\}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[C]$, $[K]$ — постійні матриці мас, демпфування і жорсткості системи; $\{\dot{x}(t)\}$, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$ — вектори прискорень, швидкостей і переміщень;

$\{\ddot{x}_0(t)\}$ — кінематичне навантаження (прискорення коливань ґрунту в основі будівлі), яке відповідає змінній t (часу).

Початкові швидкості вважаємо нульовими, а початкові переміщення отримуємо за результатами розв'язання системи рівнянь (1) за умов першого навантаження власною вагою будівлі згідно з ПК ЛІРА САПР-2021 [26].

Із виразу (1) як системи звичайних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами випливає, що апроксимувати швидкості, прискорення та переміщення можна методом скінченних різниць. Для прискорень у момент часу t з використанням методу центральних різниць систему рівнянь руху можна записати у вигляді [33]:

$$\left[\frac{2M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K \right] (\{X(t + \Delta t)\} + \{X(t - \Delta t)\}) = 2 \left(-M\{X_0(t)\} + \frac{2M}{\Delta t^2} \{X(t)\} + \frac{C}{\Delta t} \{X(t - \Delta t)\} \right). \quad (2)$$

«Нові» переміщення $\{X(t + \Delta t)\}$ визначаються з урахуванням отриманих раніше переміщень $\{X(t)\}$ та $\{X(t - \Delta t)\}$ з чисельного розв'язання системи рівнянь (2). У науковій літературі подібні схеми інтегрування називають схемами неявного інтегрування. Розглядувана схема має назву модифікованого методу центральних різниць. Рівняння (2) є вихідними для розв'язання як лінійних, так і нелінійних задач прямим динамічним розрахунком в ПК ЛІРА САПР-2021 [26].

У подальшому в ПК ЛІРА САПР-2021 виконується кроковий нелінійний просторовий розрахунок будівельних конструкцій за умов дії статичних вертикальних навантажень та горизонтальних динамічних впливів за двома напрям-

ками (X, Y). У результаті на кожному i -му кроці навантаження визначають переміщення елементів конструкцій та кути повороту, зусилля в колонах, ригелях, плитах перекриттів, напруження в елементах стін, а також стан бетону та арматури. Зазначимо, що ПК ЛІРА САПР-2021 дає змогу визначити амплітуди переміщень, швидкостей, прискорень вузлів розрахункової сітки та напруження, проте без урахування залишкових деформацій бетону тільки для окремих елементів балок-стінок. Отримувані розрахункові динамічні діаграми деформування поверхів будівлі дають змогу згодом виконувати нелінійний динамічний розрахунок багатомасової моделі будівлі з урахуванням фізичної не-

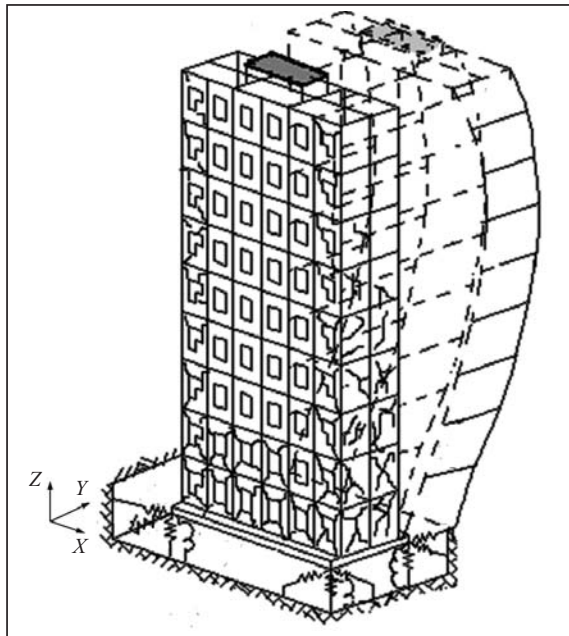


Рис. 4. Просторова розрахункова динамічна модель будівлі як континуальної системи з урахуванням пружної ґрунтової основи, маси фундаменту, моменту інерції фундаменту, мас поверхів будівлі, їхніх моментів інерції, зсувної та згинальної жорсткостей конструкцій поверхів будівлі

лінійності бетону та арматури за умов знакозмінних динамічних впливів, а також різного демпфування підсистем з урахуванням натурних або синтезованих акселерограм.

Натурні або синтезовані акселерограми є початковими умовами для чисельного розв'язання початково-крайової задачі за допомогою програмного комплексу ЛІРА САПР-2021 [26]. Далі оцінюються ризики руйнування конструкцій будівлі.

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНОГО РИЗИКУ

Ризики руйнування конструкцій будівлі визначається зіставленням двох величин: параметра зовнішнього навантаження S , що обчислюється з урахуванням динамічного навантаження, та параметра опору конструкції R [34, 35]. Ці величини розглядаються як випадкові і позначаються однаковими одиницями вимірювання. Граничний стан конструкції визначається умовою [34]

$$R < S \text{ або } R - S < 0, \quad (3)$$

де S — параметр зовнішнього навантаження, що обчислюється з урахуванням динамічного навантаження; R — параметр опору конструкції [34, 35].

Область допустимого ризику m визначається з умови

$$m = R - S. \quad (4)$$

Кожна розглядувана величина вважається нормально розподіленою (або має інший розподіл) та характеризується двома параметрами (3), (4): математичним сподіванням ($\bar{R}$, $\bar{S}$ або $\bar{m}$) та середньоквадратичним відхиленням (δ_R , δ_S , δ_m).

Для обчислення ризиків використано такі основні співвідношення [34]:

$$\begin{aligned} \bar{m} &= \bar{R} - \bar{S}, \\ \delta_m &= \sqrt{\delta_R^2 + \delta_S^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для визначення ризиків руйнування конструкцій використовують відомі залежності теорії ймовірностей [34, 35]. Ризик руйнування конструкції визначається за формулою

$$\text{risk} = 0.5 \pm 0.5 \cdot \varphi\left(\frac{\bar{R} - \bar{S}}{\delta_m}\right). \quad (6)$$

Значення інтеграла ймовірності Гауса $\varphi(u)$ визначають за таблицями ймовірнісних функцій [36] або за аналогічними таблицями:

$$\varphi(u) = \varphi\left(\frac{\bar{R} - \bar{S}}{\delta_m}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-u}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (7)$$

Отже, побудуємо алгоритм обчислення ризику руйнування конструкції (6), (7).

1. Параметр узагальненого опору конструкції $\bar{R}$ та узагальнений параметр прикладеного навантаження $\bar{S}$ мають бути представлені однаковими одиницями вимірювання. Такими величинами будуть контрольовані параметри граничних станів (деформаційні або силові).

2. Для всіх змінних, що застосовують в розрахунках, потрібно отримати статистичні дані (математичні сподівання $\bar{R}$, $\bar{S}$ і середньоквадратичні відхилення δ_R , δ_S), обчислені для кожного розглядуваного граничного стану.

3. Узагальнені значення параметрів зовнішнього навантаження $\bar{S}$ і δ_S визначаються на основі будівельних норм або експериментально.

4. Розраховане значення ризику руйнування порівнюють зі значенням, допустимим для цього граничного стану. На підставі цього порівняння визначають, чи є безпечною аналізована конструкція.

Комплексна прикладна методика визначення залишкового ресурсу будівель в зоні бойових дій матиме такий вигляд: 1) візуальне обстеження будівлі з фіксацією її руйнувань; 2) динамічні вимірювання в будівлі з метою оцінювання її динамічної реакції та визначення частот власних коливань (ці дані потрібні для верифікації розрахункової моделі); 3) побудова графічної моделі будівлі з урахуванням результатів п. 1; 4) ідентифікація розрахункової моделі; 5) проведення комплексу динамічних розрахунків напружено-деформованого стану будівлі; 6) оцінювання ризику руйнування конструкцій будівлі; 7) побудова кривої життєвого циклу будівлі, кількісне оцінювання залишкового ресурсу.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ БАГАТОПОВЕРХОВОЇ БУДІВЛІ-27 ПІСЛЯ ВЛУЧЕННЯ В НЕЇ РАКЕТИ

Звіти ДП НДІБК містять результати візуальних обстежень, відповідні фотофіксації та детальний опис пошкоджень та руйнувань будівлі-27 та інших будівельних споруд [37–39]. Для порівняння в табл. 1 і табл. 2 наведено параметри коливань будівлі з ушкодженнями та будівлі без ушкоджень. Комп'ютерну модель будівлі-27 з елементами ушкоджень в межах 18–21-го поверхів наведено на рис. 1. Верифікацію моделі та розрахунки виконано у середовищі ПК ЛІРА САПР-2021 з використанням розробленої просторової моделі фрагмента будинку-27 (16–26 поверхи) [26, 33, 37].

Розглянуто два варіанти моделей: лінійна та нелінійна з урахуванням фізичної нелінійності бетону та арматури. Розрахунки несівної здатності перерізів монолітних залізобетонних пілонів будівлі виконували за дефор-

Таблиця 1. Параметри коливань будівлі-27 з ушкодженнями

Дата вимірювання	Час вимірювання	Точка встановлення датчиків, поверх (номер каналу)	Напрямок вимірювання	Максимальні віброприскорення, m/s^2	Переважаючі частоти коливань, Гц
06.07.2022	16:58	26 (3)	Y	0.00032	0.82, 2.82, 5.82
		22 (4)	Y	—	Дані некоректні
		16 (6)	Y	0.00035	0.82, 2.82, 5.51
14.07.2022	14:18	22 (3)	X	—	Дані некоректні
		16 (4)	X	—	Дані некоректні
		1 (6)	X	0.00024	0.73, 2.34
14.07.2022	14:59	22 (3)	X	0.0007, 0.00110	0.73, 0.95, 2.35
		22 (4)	X	—	Дані некоректні
		22 (6)	X	0.00065, 0.00110	0.73, 0.90, 2.35
	15:03	22 (3)	X	0.0003, 0.00065	0.73, 0.90, 2.32
		22 (4)	X	—	Дані некоректні
		22 (6)	X	0.00025, 0.00065	0.73, 0.93, 2.32
	15:20	22 (3)	X	0.00035, 0.00045	0.73, 0.93, 2.46
		22 (4)	X	—	Дані некоректні
		22 (6)	X	0.00032	0.73, 0.93, 2.37
	15:24	22 (3)	X	0.0007	0.73, 0.93, 2.54
		22 (4)	X	—	Дані некоректні
		22 (6)	X	0.0007	0.73, 0.93, 2.40

Таблиця 2. Параметри коливань неущодженої будівлі (аналог будівлі-27), виміряні 07.07.2022

Час вимірювання	Точка встановлення датчиків, поверх (номер каналу)	Напрямок вимірювання	Максимальні віброприскорення, м/с^2	Переважаючі частоти коливань, Гц
14:38	24 (3)	Y	0.0004	0.84, 3.09
	20 (4)	Y	0.00025	0.84
	14 (6)	Y	0.0003	0.84, 3.04
14:42	24 (3)	Y	0.0002	0.85, 3.31
	20 (4)	Y	0.0001	0.71, 3.34
	14 (6)	Y	0.0004	0.85, 3.31
14:48	24 (3)	X	0.0003	0.76, 0.92, 2.92
	20 (4)	X	0.00015	0.98
	14 (6)	X	0.00031	0.76, 0.92, 2.92
14:52	24 (3)	X	0.00035	0.75, 0.92, 2.89
	20 (4)	X	—	Дані некоректні
	14 (6)	X	0.00025	0.75, 0.92, 2.92
15:28	24 (3)	Y	0.0002	0.87, 3.23
	20 (4)	Y	—	Дані некоректні
	1 (6)	Y	—	Дані некоректні
15:31	24 (3)	Y	0.00021	0.85, 2.96
	20 (4)	Y	—	Дані некоректні
	1 (6)	Y	0.0015	2.96
15:41	24 (3)	X	0.0002	0.73, 0.92, 2.92
	20 (4)	X	—	Дані некоректні
	1 (6)	X	0.0001	0.73, 3.01
15:45	24 (3)	X	0.00035	0.75, 0.96, 2.92
	20 (4)	X	—	Дані некоректні
	1 (6)	X	0.00021	Дані некоректні

маційним методом згідно з положеннями ДБН В.2.6-98:2009 [40] та ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [41] з використанням просторової лінійної та нелінійної моделей фрагмента будинку-27 у середовищі ПК ЛІРА САПР-2021 [26].

З порівняння частот власних коливань двох будівель (табл. 1 та табл. 2) впливає наявність тріщиноутворення в будівлі, пошкодженій внаслідок влучання ракети (власна частота коливань на 20–30 % менша у порівнянні з неущодженою будівлею).

Результати визначення максимальних зусиль та несівної здатності перерізів максимально навантажених пілонів будинку наведено в табл. 3. З аналізу табл. 3 випливає, що нагальною є потреба підсилення пошкоджених пілонів на 18–21-му поверхах будинку-27, оскільки відношення несівної здатності перерізу до поздовжнього зусилля стиснення на 20-му поверсі на осях 2/Ж та 3/Ж не тільки не має запасу міцності, як на поверсі 17 на осях 2/Е та 2/Д, а навіть є меншим ніж одиниця. До того ж на 17-му поверсі на осі 2/Ж теж немає потрібного запасу міцності (1.02), що є неприпустимим для нормальної експлуатації.

Таблиця 3. Результати визначення максимальних зусиль та несівної здатності перерізів максимально завантажених пілонів будинку

Поверх	Вісь	Поздовжнє зусилля стиснення (кН)	Згинальний момент (кН · м)	Несівна здатність перерізу (кН)	Відношення несівної здатності перерізу до зусилля
17	2/Ж	8050	131	8211	1.02
17	2/Е	5400	93	8100	1.5
17	2/Д	4600	37	7820	1.7
20	2/Ж	6466	91	5900	0.9
20	3/Ж	6678	86	5946	0.89

Результати розрахунків несівної здатності пілонів будинку дають змогу зробити такі висновки.

1. Аналіз отриманих показників табл. 3 свідчить про потребу в підсиленні пошкоджених пілонів на 18–21-му поверхах будинку.

2. У пілонах на осях 2/Ж та 3/Ж на 18-, 19- та 20-му поверхах не забезпечено несівної здатності, тому потрібно ці пілони або підсилити, або замінити на нові.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цій статті виконано оцінювання ризику руйнування конструкцій будівлі та побудовано криву її життєвого циклу [24, 31]. Це дало змогу обчислити кількісну оцінку залишкового ресурсу будівлі-27. На рис. 5 зображено проєкції просторового графіка кривих зміни несівної здатності будівлі-27 (1) та її аналога (2) як функцій часу. Ілюстрації виконано в декартовій системі координат для секторального зображення чотирьох зон технічного стану будівель згідно з [32] заданим терміном T (роки) експлуатації багатоповверхових житлових будівель. На рис. 5 зона **a** — будівля відповідає нормальному стану, **b** — будівля відповідає задовільному стану, **c** — будівля непридатна для нормальної експлуатації, **d** — будівля в аварійному стані. Середній термін експлуатації будівлі для кожного технічного стану складає приблизно 29 років. Для будинку-27 зона **b** взагалі відсутня.

Графік кривої несівної здатності 1 будівлі-27 представлено на рис. 6. До точки А, яка є тотожною точці В, відсутні ушкодження в будинку-27. Тому крива 1 (див. рис. 6) для будинку-27 буде збігатися з кривою несівної здатності 2 (рис. 7) для неушкодженої будівлі-аналога. У цій точці параметри коливань будинків вважатимемо однаковими. Після нанесення ушкоджень у будинку-27 змінюються параметри коливань (переважальні частоти, амплітуди тощо). Ці зміни в будівлі-27 відображено в точці А'. З цього моменту будівля стає непридатною для нормальної експлуатації (зона **c**) і більш податливою до переміщень за визначеними напрямками X та Y . Це спостерігається після зіставлення значень відповідних максимальних вібропереміщень в ідентичних точках будівлі-27 та її аналога. За наявних умов термін експлуатації будинку-27 після нанесених ушкоджень зменшується приблизно на 30 років. Для відновлення нормального технічного стану будівлі-27 потрібно провести ремонтні роботи.

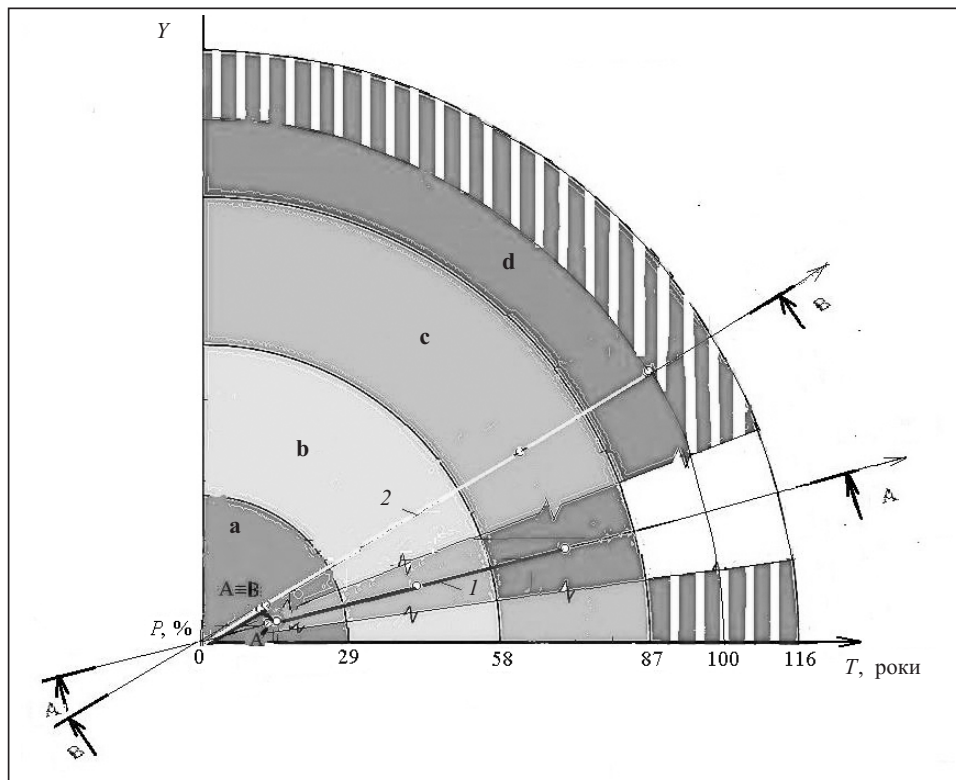


Рис. 5. Проекції просторового графіка кривих зміни несівної здатності I та 2 як функцій часу

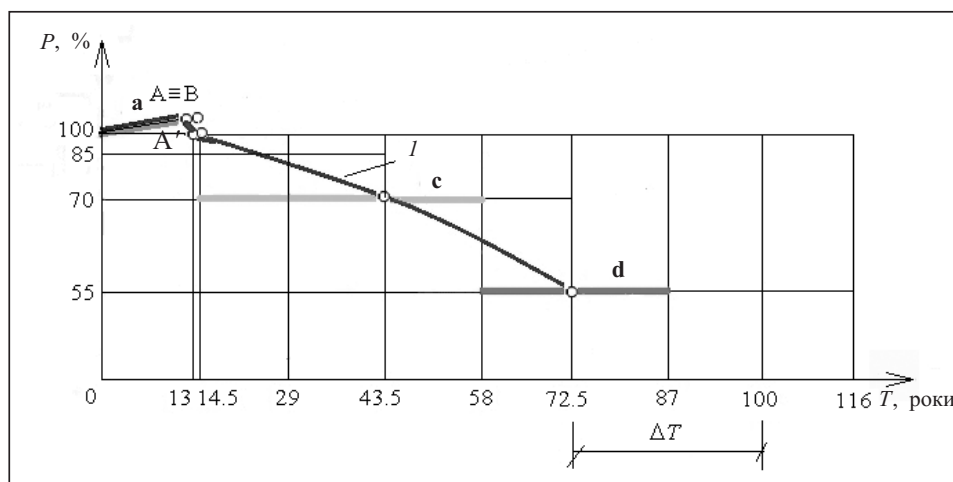


Рис. 6. Проекції кривих зміни несівної здатності I як функцій часу для будівлі-27

На рис. 7 зображено криву несівної здатності для аналога будівлі-27. Для ньогою характерна наявність всіх чотирьох зон технічного стану будівлі.

За результатами досліджень маємо такі висновки.

1. Розглянуто особливості застосування теорії ризику та чисельного моделювання для визначення ресурсу будівель, розташованих у зоні бойових дій. При цьому потрібно оцінити поточний вік будівлі з урахуванням часткових руйнувань та (або) динамічних впливів, а також обчислити залишковий ресурс будівлі та заподіяні економічні збитки внаслідок бойових дій протягом певного проміжку часу (навіть за умови зовнішньої цілісності).

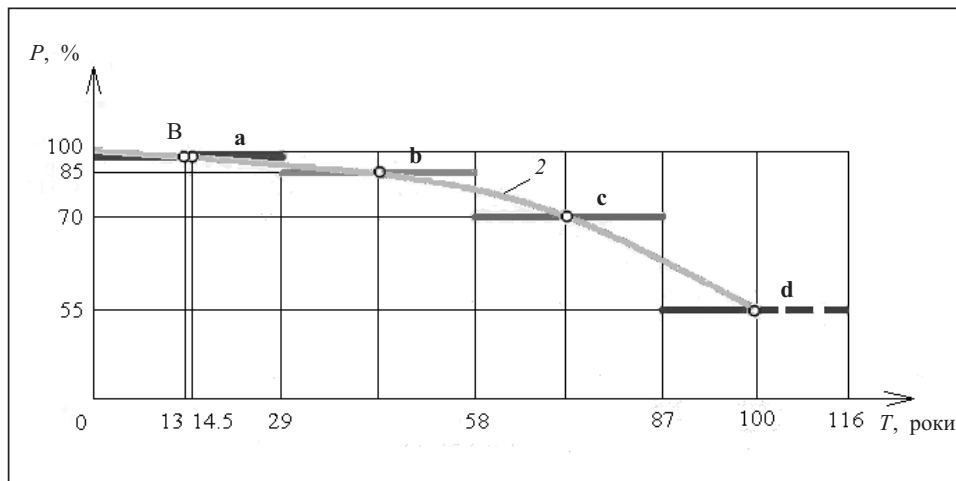


Рис. 7. Проекції кривих зміни несівної здатності 2 як функцій часу для аналога будівлі-27

2. Розроблено комплексну прикладну методику визначення залишкового ресурсу будівель в зоні бойових дій, а саме: 1) візуальне обстеження будівлі з фіксацією її руйнувань; 2) динамічне вимірювання в приміщеннях будівлі з метою оцінювання її динамічної реакції та визначення частот власних коливань (ці дослідження потрібні для верифікації розрахункової моделі); 3) побудова графічної моделі будівлі з урахуванням результатів п. 1; 4) ідентифікація розрахункової моделі; 5) здійснення комплексу динамічних розрахунків напружено-деформованого стану будівлі; 6) оцінювання ризику руйнування конструкцій будівлі та побудова кривої її життєвого циклу, кількісне оцінювання залишкового ресурсу будівлі.

3. Методику застосовано для визначення залишкового ресурсу багатоповерхової будівлі-27 після влучення ракети. Зниження ресурсу порівняно з непошкодженим станом оцінюється у 25–35 років. Відповідний економічний збиток оцінюється у 25–35 % первісної вартості будівлі без урахування корисної вартості квартир.

4. Отримані розрахунки несівної здатності пілонів будинку-27 після влучення ракети дають змогу дійти висновків про нагальну потребу підсилення пошкоджених пілонів на 18–21-му поверхах будинку. У пілонах на осях 2/Ж та 3/Ж на 18-, 19- та 20-му поверхах не гарантовано несівної здатності, тому потрібно ці пілони або підсилити, або замінити на нові. Попередні припущення про знесення всієї будівлі не підтвердилися.

5. Наведені розрахункові дані в окремих випадках корелюють з наближеною методикою оцінювання залишкового ресурсу [42].

Автори статті висловлюють подяку співробітникам ДП НДІБК Іщенко Ю.І., та Лісеному О.М. за участь у візуальних обстеженнях будинків, що зазнали пошкодження внаслідок влучання ракет та снарядів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гладкий А.В., Сергиенко И.В., Скопецкий В.В. Численно-аналитические методы исследования волновых процессов. Київ: Наук. думка, 2001. 452 с.
2. Khimich O.M., Chistyakova T.V., Sidoruk V.A., Yershov P.S. Adaptive computer technologies for solving problems of computational and applied mathematics. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, N 6. P. 990–997. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00424-z>.
3. Kalyukh Y., Senatorov V. Problems of resource evaluation of highly responsible and especially massive RC hydrotechnical structures. *fib Symposium Prague 2011 "Concrete Engineering for Excellence and Efficiency"*: Proceedings. 2011. Vol. 1. P. 627–630.
4. Khimich O.M., Popov O.V., Chistyakov O.V., Sidoruk V.A. A parallel algorithm for solving a partial eigenvalue problem for block-diagonal bordered matrices. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 6. P. 913–923. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00311-z>

5. Khimich A.N., Nikolaevskaya E.A. Existence and uniqueness of weighted normal pseudosolutions. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 4. P. 544–549. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00270-5>.
6. Kaliukh I., Trofymchuk O., Lebid O. Numerical solution of two-point static problems for distributed extended systems by means of the Nelder–Mead method. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 4. P. 616–624. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00170-3>.
7. Alonso-Rodriguez A., Nikitas N., Knappett J., Kampas G., Anastasopoulos I., Fuentes R. System identification of tunnel response to ground motion considering a simplified model. *Frontiers in Built Environment*. 2018. N 4. P. 1–11.
8. Barla M., Antolini F., Dao S. Il monitoraggio delle frane in tempo reale. *Strade e Autostrade*. 2014. N 5. P. 2–5.
9. Frodella W., Ciampalini A., Bardi F., Salvatici T., Di Traglia F., Basile G., Casagli N. A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*. 2018. Vol. 15, N 2. P. 183–197.
10. Kaliukh I., Lebid O. Constructing the adaptive algorithms for solving multi-wave problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, N 6. P. 938–949. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00419-w>.
11. Intrieri E., Gigli G., Gracch T., Nocentini M., Lombardi L., Mugnai F., Frodella W., Bertolini G., Carnevale E., Favalli M., Fornaciai A., Alavedra J.M., Mucchi L., Nannipieri L., Rodriguez-Lloveras X., Pizzolo M., Schina R., Trippi F., Casagli N. Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 238, N 1. P. 1–14.
12. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Complexity of one packing optimization problem. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, N 1. P. 76–84. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9802-9>.
13. Trofymchuk O., Lebid O., Klymenkov O., Berchun Y., Berchun V., Kaliukh I., Marjenkov M., Shekhunova S., Havrilyuk R. Dynamic certification of landslide protection structures in a seismically hazardous region of Ukraine: Experimental and analytical research. *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions: Proc. of the 7th Intern. Conf. on Earthquake* (June 17–20, 2019, Rome, Italy). 2019. P. 5337–5344.
14. Gomilko A.M., Gorodetskaya N.S., Trofimchuk A.N. Harmonic vibrations of a rigid impervious punch on a porous elastic base. *International Applied Mechanics*. 1999. Vol. 35, N 12. P. 1277–1286. <https://doi.org/10.1007/BF02682402>.
15. Trofymchuk O., Kaliukh I., Silchenko K., Polevetskiy V., Berchun V., Kalyukh T. Use of accelerogram of real earthquakes in the evaluation of the stress-strain state of landslide slopes in seismically active regions of Ukraine. In: *Engineering Geology for Society and Territory*. Vol. 2. Cham: Springer, 2015. P. 1343–1346. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_236.
16. Lollino G., Chiara A. UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*. 2006. Vol. 3, N 4. P. 311–321.
17. Martinelli M., Burghignoli A., Callisto L. Dynamic response of a pile embedded into a layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2016. Vol. 87. P. 16–28.
18. Kaliukh Y.I., Vusatiuk A.Y. Factorization in problems of control and dynamics of lengthy systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol. 55, N 2. P. 274–283. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00132-9>.
19. Shokrabadi M., Burton H.V., Stewart J.P. Impact of sequential ground motion pairing on mainshock-aftershock structural response and collapse performance assessment. *Structural Engineering*. 2018. Vol. 144, N 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002170](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002170).
20. Wang Y., Rathje E.M. Application of a probabilistic assessment of the permanent seismic displacement of a slope. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2018. Vol. 144, N 6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001886](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001886).
21. Губарев В.Ф. Рациональная аппроксимация систем с распределенными параметрами. *Кибернетика и системный анализ*. 2008. № 2. С. 99–115.
22. Kaliukh I., Lebid O. Application of asymptotic and numerical methods to determine stability boundaries of distributed systems in a flow. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 2. P. 233–241. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00455-0>.
23. Kaliukh I., Dunin V., Berchun Y. Decreasing service life of buildings under regular explosion loads. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54, N 6. P. 948–956. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0098-9>.

24. Дунін В.А. Вплив промислових вибухів на довговічність конструкцій будівель в умовах м. Кривий Ріг: Дис. ... канд. техн. наук. ДП НДІБК. Київ, 2021. 205 с.
25. Baranov A.Yu., Popov A.V., Slobodyan Ya.E., Khimich A.N. Mathematical modelling of building constructions using hybrid computing systems. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. Vol. 49, Iss. 7. P. 18–32.
26. Програмний комплекс ЛІРА САПР-2021. Київ: ТОВ «ЛІРА-САПР».
27. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. Москва, 2002.
28. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. Москва, 2005.
29. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. Москва, 2006.
30. МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения. ФГУП «НИЦ «Строительство». Москва: ОАО «ЦПП», 2008. 16 с.
31. fib Bulletin 59, Condition control and assessment of reinforced concrete structures. State-of-art report. May 2011. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/condition-control-and-assessment-of-reinforced-concrete-struct-detail.html>.
32. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану ДСТУ-Н Б.1.2-18:2016. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
33. Марьенков Н.Г. Развитие теории и методов расчета сейсмостойких зданий и сооружений: Дис. ... д-р техн. наук. ОГАСА. Одесса, 2012. 315 с.
34. Синицин А.П. Расчет конструкций на основе теории риска. Москва: Стройиздат, 1985, 304 с.
35. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. Москва: Стройиздат, 1988, 584 с.
36. Таблицы вероятностей функций. Т. 2. Москва: Вычислительный центр АН СССР, 1970. 343 с.
37. Обстеження, оцінка технічного стану та придатності до подальшої експлуатації житлового будинку по проспекту Лобановського, 6-а в м. Києві із визначенням першочергових протиаварійних заходів для стабілізації несучих конструкцій. Звіт про науково-технічну роботу. ДП НДІБК, 2022. 150 с.
38. Висновок. Виконання первинного та детального технічного обстеження будівель, що пошкоджені внаслідок бойових дій у м. Буча Київської області. Київ: ДП НДІБК, 2022. 80 с.
39. Звіт про виконання детального обстеження технічного стану корпусу № 2 житлового будинку на вул. Генерала Белова, 37 в м. Чернівці з розробкою технічних рішень з відновлення його експлуатаційної придатності. ДП НДІБК, 2022. 66 с.
40. ДБН В.2.6-98:2009 Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зміна № 1. Київ, 2011. 71 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=89810.
41. ДСТУ Б В.2.6-156:2010 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ, 2011. 117 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26932.
42. Фаренюк Г., Белоконь О., Немчинов Ю., Мар'єнков М., Богдан Д., Бабік К., Байтала Х. Оцінка стану будівель і споруд вібродинамічним методом після військових пошкоджень. *Наука та будівництво*. 2022. Т. 32, № 2. С. 3–18.

I. Kaliukh, V. Dunin, M. Marienkov, O. Trofymchuk, S. Kurash
PECULIARITIES OF APPLYING THE RISK THEORY AND NUMERICAL MODELING
TO DETERMINE THE RESOURCE OF BUILDINGS IN A ZONE OF INFLUENCE
OF MILITARY ACTIONS

Abstract. The features of the application of the risk theory and numerical modeling to determine the resource of buildings in the combat zone is considered. A quantitative comprehensive assessment of the reduction in the resource of damaged buildings is given. A comprehensive applied method for determining the residual resource of buildings in a combat zone is developed. A graphical model of the building is created, taking into account the results of a visual survey. The dynamics of the stress-strain state of the buildings is calculated. The risks of destruction of building structures are assessed, and a curve of their life cycle is constructed.

Keywords: mathematical modeling, stress-strain state, risk, combat dynamic effects, life resource.

Надійшла до редакції 23.01.2023