

УДК 624.042.8:624.012.45:614.8

ПАРАМЕТРИЧНЕ ОБЧИСЛЮВАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСЛЯАВАРІЙНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ КАРКАСНОЇ БУДІВЛІ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ

DOI: 10.52363/2518-1777-2026-21-7

Томенко В. І¹., ORCID iD 0000-0001-7139-9141
Томенко М. Г²., ORCID iD 0000-0002-2354-9106
Мельник Р. П¹., ORCID iD 0000-0002-5622-5642
Мельник О. Г¹., ORCID iD 0000-0002-9671-108X
*E-mail: melnyk.olja.2014@gmail.com

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Київський науково-дослідний інститут судових експертиз, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

10.05.2026

Прийнято: 01.05.2026

Опубліковано:

30.05.2026

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

залізобетонна каркасна будівля; локальний динамічний вплив; імпульсне навантаження; обчислювальний експеримент; інтегральне пошкодження; залишкова несуча здатність; оперативна надійність; небезпечні ділянки; цивільний захист.

АНОТАЦІЯ

У статті наведено результати параметричного обчислювального дослідження післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі після локального динамічного імпульсного впливу. Актуальність роботи зумовлена потребою оперативного визначення залишкової несучої здатності будівель, що зазнали локального ударно-вибухового пошкодження, та обґрунтування рішень щодо безпечного доступу особового складу під час аварійно-рятувальних робіт. Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни післяаварійного стану просторової залізобетонної каркасної будівлі залежно від параметрів локального динамічного імпульсу та локалізація небезпечних ділянок у пошкодженій несучій системі. У роботі застосовано прямий нелінійний динамічний аналіз, параметричне моделювання п'яти сценаріїв впливу та редукцію фізико-механічних характеристик матеріалів у пошкоджених зонах. Для кількісної оцінки наслідків використано інтегральний показник конструктивного пошкодження, коефіцієнт залишкової несучої здатності, індекс структурної живучості та індекс оперативної надійності. Установлено, що зі зростанням інтенсивності локального імпульсу інтегральне пошкодження зростає від 0,12 до 0,74, коефіцієнт залишкової несучої здатності зменшується від 0,93 до 0,29, а індекс оперативної надійності — від 0,72 до 0,01. Показано, що найбільш небезпечні зони концентруються на нижніх поверхах у районі прикладання імпульсу та у вертикальному ланцюгу елементів над пошкодженою ділянкою. Наукова новизна полягає у поєднанні параметрів локального динамічного впливу з інтегральними показниками післяаварійної працездатності та просторовою картою небезпечних ділянок. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для планування маршрутів доступу, визначення місць тимчасового підсилення та вибору безпечної тактики пошуково-рятувальних робіт.

Постановка проблеми. Унаслідок локального динамічного ударно-вибухового впливу будівля або окремі її конструктивні елементи можуть втрачати несучу здатність, що супроводжується зміною просторової роботи конструктивної системи та створює ризик розвитку прогресуючого обвалення. Для системи

цивільного захисту це має принципове значення, оскільки в післяаварійній ситуації необхідно не лише встановити факт руйнування конструкцій, а й у стислі терміни визначити, чи зберігає будівля залишкову надійність, які її ділянки є найбільш небезпечними та чи можливе безпечне перебування людей і

рятувальників у межах пошкодженої споруди.

Особливу небезпеку становить вторинне руйнування конструкцій, яке може виникати вже після завершення первинного локального впливу. На практиці це означає, що будівля, яка зовні частково зберегла геометричну цілісність, може фактично перебувати у стані прихованої нестійкості через локальне зниження жорсткості елементів, пошкодження вузлів, втрату сумісної роботи бетону й арматури або перерозподіл зусиль на елементи, які не були розраховані на відповідне додаткове навантаження. За таких умов візуального огляду недостатньо, а спрощені інженерні висновки без кількісного обґрунтування можуть призвести до помилкових рішень щодо організації пошуково-рятувальних робіт [10–12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика прогресуючого обвалення, живучості будівель та оцінювання їхнього післяаварійного технічного стану посідає важливе місце у міжнародних та вітчизняних дослідженнях у галузі будівельної механіки, захисного будівництва та цивільного захисту. Нормативною основою моделювання залізобетонних елементів є положення Eurocode 2 [1], а для опису екстремальних вибухових дій широко використовуються рекомендації UFC 3-340-02 [2] та класичні положення щодо імпульсних навантажень, наведені у роботі [3].

У документах GSA [4, 5] і рекомендаціях NIST [6] систематизовано непрямі та прямі підходи до зменшення ризику прогресуючого обвалення. Перевагою цих документів є чітка логіка перевірки альтернативного шляху передавання навантаження, однак вони переважно орієнтовані на оцінювання стійкості системи після умовного вилучення елементів і меншою мірою враховують реальну деградацію матеріалів та локальне зниження жорсткості у пошкоджених зонах.

Процедури FEMA P-2055 [7] та ATC-20 [8] призначені для оперативного

інженерного оцінювання пошкоджених будівель після небезпечної події. Їх сильним боком є можливість швидко приймати рішення щодо доступу до споруди, проте основою таких процедур здебільшого залишаються результати візуального огляду та експертного судження, а не просторовий обчислювальний аналіз залишкової несучої здатності й зон вторинної небезпеки.

У науковій роботі [9] запропоновано схему швидкої оцінки пошкодження регулярних залізобетонних рам під дією зовнішніх вибухів із використанням обмеженої кількості найбільш інформативних параметрів. Для українського наукового контексту вагомими є дослідження [10; 11], у яких обґрунтовано необхідність нелінійного розрахунку після локального руйнування та показано роль зміненої розрахункової схеми в розвитку прогресуючого обвалення.

У науковій роботі [12] систематизовано причини непропорційного руйнування залізобетонних будівель за стадіями проектування, будівництва та експлуатації, а у наукових роботах [13; 14] розкрито підходи до аналізу стійкості конструкцій за екстремальних динамічних впливів і запобігання прогресуючому обваленню за рахунок конструктивних заходів. Водночас у зазначених наукових роботах не сформовано єдиної процедури, яка б поєднувала локальну деградацію матеріалів, інтегральне післяаварійне оцінювання та просторове зонування небезпечних ділянок для потреб цивільного захисту.

Отже, не вирішеною частиною проблеми залишається встановлення закономірностей зміни інтегральних показників пошкодження та післяаварійної надійності будівлі залежно від параметрів локального динамічного імпульсу, а також перехід від результатів прямого нелінійного обчислювального аналізу до просторової карти небезпечних ділянок, придатної для підтримки рішень у системі цивільного захисту.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є встановлення закономірностей зміни

післяаварійного стану залізобетонної каркасної будівлі та просторового розподілу небезпечних ділянок залежно від параметрів локального динамічного імпульсного впливу.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі завдання:

- 1) сформовано параметричну розрахункову модель будівлі з урахуванням просторової роботи несучої системи;
- 2) задано серію сценаріїв локального імпульсного впливу з варіюванням пікового тиску, тривалості позитивної фази та площі прикладання;
- 3) визначено інтегральні показники пошкодження, залишкової несучої здатності, структурної живучості та оперативної надійності;
- 4) проаналізовано зміну зазначених показників залежно від інтенсивності впливу та побудовано карту небезпечних ділянок будівлі.

Матеріали та методи дослідження.

Для дослідження прийнято регулярну дев'ятиповерхову залізобетонну каркасну будівлю прямокутної форми в плані розмірами 24 × 18 м. Просторова схема включала чотири кроки колон у поздовжньому напрямку та три кроки у поперечному. Висота типового поверху становила 3,3 м. Несучу систему моделювали колонами, ригелями та плитами перекриття з урахуванням просторової сумісної роботи; у центральній частині передбачали діафрагму жорсткості, а перекриття розглядали як жорсткі диски в площині поверху [1].

Для бетону приймали клас С30/37 із модулем пружності 30 ГПа, розрахунковою міцністю на стиск 30 МПа та розтяг 2,9 МПа. Для арматури використовували клас А500 з модулем пружності 200 ГПа та межею текучості 500 МПа. На початковому етапі визначали напружено-деформований стан будівлі від власної ваги, тривалих навантажень і нормативного експлуатаційного навантаження на перекриття.

Локальний аварійний вплив задавали у вигляді узагальненого імпульсного

навантаження. Для опису позитивної фази використовували функцію Ф. Г. Фрідлендера [2; 3], а реакцію конструктивної системи визначали на основі прямого нелінійного динамічного аналізу з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності. Для кількісної оцінки наслідків використовували інтегральний показник конструктивного пошкодження D , коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res} , індекс структурної живучості Ω_s та індекс оперативної надійності R_{op} .

Аварійний вплив у межах методу задається як узагальнене динамічне імпульсне навантаження

$$P(t) = P_{\max} \varphi(t), \quad (1)$$

де $P_{\max}$ - максимальна інтенсивність навантаження; $\varphi(t)$ - функція форми імпульсу.

Для опису позитивної фази імпульсу використовується рівняння Ф. Г. Фрідлендера

$$P(t) = P_s \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-bt/t_d}, \quad (2)$$

де P_s - піковий надлишковий тиск; t_d - тривалість позитивної фази; b - параметр форми імпульсу.

Інтегральний імпульс навантаження визначається як

$$J = \int_0^{t_d} P(t) dt. \quad (3)$$

Узагальнений вектор параметрів динамічного впливу має вигляд

$$I_{dyn} = \{P_s, t_d, J, A_{loc}, \eta_{dir}, \eta_{imp}\}, \quad (4)$$

де A_{loc} - площа локального прикладання; η_{dir} - коефіцієнт напрямленості; η_{imp} - коефіцієнт супутньої ударної складової.

Реакція конструктивної системи визначається на основі прямого нелінійного динамічного аналізу:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + R(u, t) = F_{st} + F_{imp}(t), \quad (5)$$

де M - матриця мас; C - матриця демпфування; $R(u,t)$ - нелінійний вектор внутрішніх сил; F_{st} - вектор штатних навантажень; $F_{imp}(t)$ - вектор аварійного впливу.

Така постановка дає змогу врахувати часовий розвиток переміщень, інерційні ефекти, фізичну та геометричну нелінійність, а також зміну розрахункової схеми після локального пошкодження.

Для оцінювання локального матеріального пошкодження бетону та арматури вводиться індекс

$$D_{m,i} = \max \left(\frac{\varepsilon_{c,i}}{\varepsilon_{c,lim}}, \frac{\varepsilon_{ct,i}}{\varepsilon_{ct,lim}}, \frac{\varepsilon_{s,i}}{\varepsilon_{s,lim}}, \frac{\sigma_{c,i}}{f_{c,0}}, \frac{\sigma_{s,i}}{f_{y,0}} \right), \quad (6)$$

де $\varepsilon_{c,i}$, $\varepsilon_{ct,i}$, $\varepsilon_{s,i}$ - фактичні деформації бетону та арматури; $\sigma_{c,i}$, $\sigma_{s,i}$ - відповідні напруження.

Цей показник дозволяє перейти від якісного опису руйнування до кількісного визначення ступеня локальної деградації матеріалу.

Для бетону в пошкодженій зоні залишкові характеристики задаються як

$$E_{c,res,i} = (1 - d_{c,i})E_{c,0}, \quad (7)$$

$$f_{c,res,i} = (1 - d_{c,i})f_{c,0}, \quad (8)$$

$$f_{ct,res,i} = (1 - d_{t,i})f_{ct,0}, \quad (9)$$

де $d_{c,i}$ - коефіцієнт деградації стиснутої зони; $d_{t,i}$ - коефіцієнт деградації розтягнутої зони.

Для арматури приймається

$$E_{s,res,i} = (1 - d_{s,i})E_{s,0}, \quad (10)$$

$$f_{y,res,i} = (1 - d_{s,i})f_{y,0}. \quad (11)$$

На відміну від умовного повного вилучення елементів, такий редуційний підхід дає змогу реалістичніше моделювати післяаварійний стан конструктивної системи.

Для оцінювання конструктивного пошкодження елемента застосовуємо індекс

$$D_i = \max \left(\frac{M_i}{M_{lim,i}}, \frac{N_i}{N_{lim,i}}, \frac{Q_i}{Q_{lim,i}}, \frac{u_i}{u_{lim,i}}, D_{m,i} \right), \quad (12)$$

де M_i , N_i , Q_i - поточні зусилля; $M_{lim,i}$, $N_{lim,i}$, $Q_{lim,i}$ - граничні значення; u_i - переміщення; $u_{lim,i}$ - граничні переміщення [3-4].

Інтегральний показник конструктивного пошкодження будівлі визначається як

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n w_i D_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (13)$$

де w_i - вагові коефіцієнти конструктивної значущості.

Урахування w_i дає можливість пов'язати математичну модель із тими слабкими місцями будівель, які виділено у статті про причини прогресуючого обвалення, зокрема критичними колонами, слабкими вузлами та конструктивними диспропорціями [11].

Після формування післяаварійної моделі залишкова несуча здатність визначається як

$$R_{res} = \frac{F_{ult,d}}{F_{ult,0}}, \quad (14)$$

де $F_{ult,0}$ - граничне навантаження для непошкодженої моделі; $F_{ult,d}$ - граничне навантаження для пошкодженої моделі.

Коефіцієнт післяаварійної стійкості записується так:

$$\Psi = \frac{R_{res}}{R_{req}}, \quad (15)$$

де R_{req} - необхідна несуча здатність для сприйняття нормативних навантажень.

Індекс структурної живучості визначається формулою

$$\Omega_s = \frac{R_{res}}{R_0} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda} \cdot \Psi, \quad (16)$$

де R_0 - початкова несуча здатність будівлі; Λ - коефіцієнт локалізації пошкодження.

Для оперативного практичного використання вводиться індекс оперативної надійності

$$R_{op} = R_{res}(1 - D)\Omega_s, \quad (17)$$

який дозволяє перевести результати складного чисельного аналізу у форму, придатну для швидкого інженерного висновку щодо ступеня надійності пошкодженої будівлі.

На відміну від відомих робіт [10-13], він дозволяє перевести результати складного чисельного аналізу у форму, придатну для швидкого інженерного висновку про ступінь надійності пошкодженої будівлі.

Для просторової локалізації небезпечних зон пропонується індекс небезпечності елемента

$$H_i = aD_i + \beta(1 - \alpha_i) + \gamma w_i, \quad (18)$$

де H_i - індекс небезпечності ділянки; α_i - коефіцієнт збереження жорсткості; w_i - конструктивна значущість; α , β , γ - вагові коефіцієнти.

Виклад основного матеріалу. Для перевірки працездатності запропонованого підходу виконано контрольний параметричний обчислювальний експеримент на модельній просторовій

залізобетонній будівлі каркасного типу. Постановка експерименту була спрямована на оцінювання зміни післяаварійного стану будівлі залежно від інтенсивності локального динамічного імпульсного впливу та на встановлення зв'язку між параметрами цього впливу, рівнем пошкодження конструктивної системи, залишковою несучою здатністю і просторовим розподілом небезпечних ділянок.

Параметри контрольного експерименту наведено в табл. 1. П'ять сценаріїв відрізнялися піковим тиском, тривалістю позитивної фази та площею локального прикладання. Таке параметричне задання було вибрано з метою забезпечення універсальності підходу й можливості аналізувати не конкретний тип ураження, а загальні закономірності реакції будівлі на локальний короточасний динамічний вплив

Таблиця 1 – Параметри контрольного обчислювального експерименту

Сценарій	Піковий тиск P_s , кПа	Тривалість t_d , мс	Площа A_{loc} , м ²	Характеристика сценарію
S1	35	12	4	низький локальний вплив
S2	70	8	4	помірний локальний вплив
S3	120	6	6	підвищений локальний вплив
S4	180	4	6	інтенсивний локальний вплив
S5	240	3	8	гранично інтенсивний локальний вплив

Джерело: розроблено авторами

У часовій області вплив описували функцією Ф. Г. Фрідлендера [2; 3], яка дає змогу коректно відтворити позитивну фазу імпульсного навантаження. Для кожного сценарію задавали значення пікового тиску та тривалості позитивної фази, після чого обчислювали інтегральний імпульс навантаження. Таким чином, у межах

експерименту варіювали не лише максимальну інтенсивність дії, а й її інтегральний ефект, що дало змогу простежити поведінку будівлі в ширшому параметричному просторі.

Після задання вихідних параметрів для кожного сценарію виконувався прямий нелінійний динамічний розрахунок

конструктивної системи в часовій області. У результаті такого розрахунку визначалися максимальні переміщення вузлів, зусилля у критичних елементах, локальні деформації бетону та арматури, а також ступінь перевищення граничних станів за міцністю, жорсткістю і деформативністю. Для переходу до післяаварійного оцінювання для пошкоджених елементів формувалася модифікована розрахункова модель, у якій фізико-механічні характеристики матеріалів редукувалися відповідно до рівня локального пошкодження.

Першим етапом аналізу була оцінка інтегрального показника пошкодження будівлі D залежно від пікового тиску динамічного впливу. Встановлено, що зі зростанням пікового тиску спостерігається стійка тенденція до збільшення інтегрального пошкодження конструктивної системи. При переході від сценарію S1 до сценарію S5 значення показника D зростає від 0.12 до 0.74, тобто більш ніж у шість разів. Характер кривої свідчить, що на початковому етапі зростання пошкодження є відносно плавним, однак після досягнення певного рівня інтенсивності впливу спостерігається прискорення деградації системи.

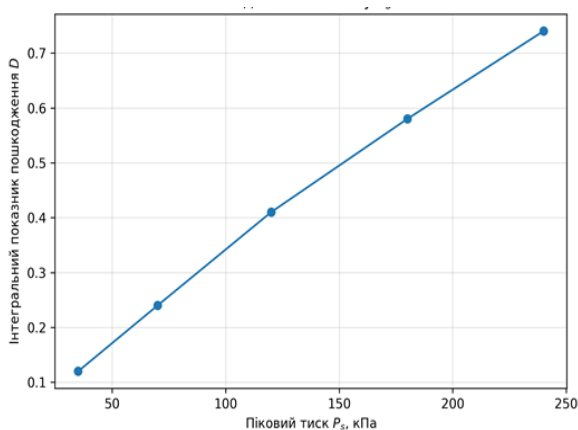


Рисунок 1 – Залежність інтегрального показника пошкодження D від пікового тиску P_s

Другим етапом аналізу було дослідження зміни коефіцієнта залишкової несучої здатності R_{res} та індексу

оперативної надійності R_{op} залежно від імпульсу навантаження J . Отримані залежності демонструють, що зі зростанням імпульсу обидва показники зменшуються, однак швидкість їх зниження є різною. Коефіцієнт залишкової несучої здатності відображає здатність пошкодженої будівлі сприймати нормативне навантаження порівняно з непошкодженим станом, тоді як індекс оперативної надійності додатково враховує інтегральний рівень пошкодження та структурну живучість системи.

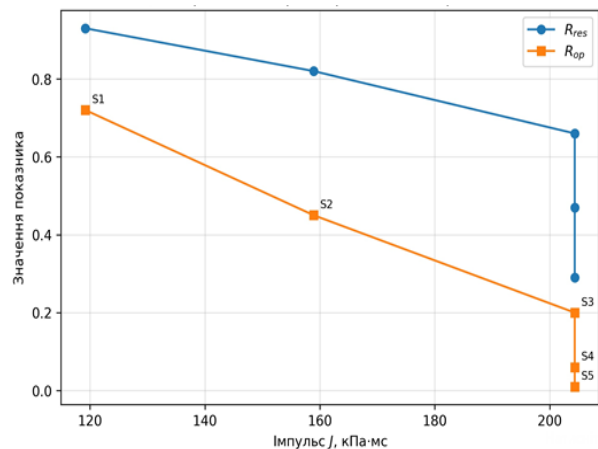


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта залишкової несучої здатності R_{res} та індексу оперативної надійності R_{op} від імпульсу J

Третім етапом аналізу стало просторове дослідження небезпечності конструктивних зон за сценарієм S4, який було прийнято як репрезентативний приклад інтенсивного локального динамічного впливу. Аналіз карти свідчить, що найбільш небезпечними є нижні поверхи будівлі в зоні безпосереднього прикладання аварійного впливу, а також вертикальний ланцюг елементів над пошкодженою ділянкою. Саме тут формуються максимальні значення індексу небезпечності, що обумовлено поєднанням кількох факторів: високого рівня локального пошкодження, значної втрати жорсткості та високої конструктивної значущості відповідних елементів у просторовій системі.

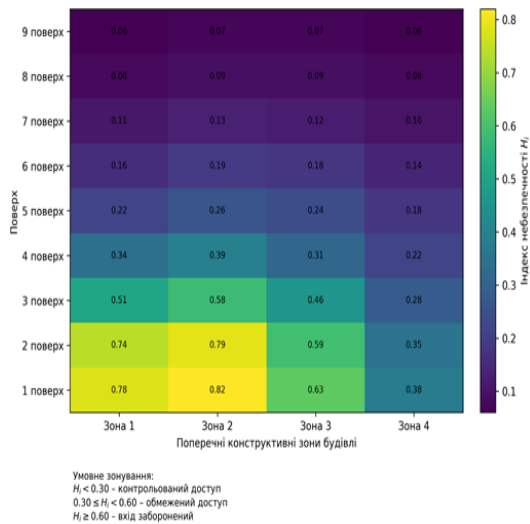


Рисунок 3 – Просторова карта небезпечних ділянок будівлі для сценарію S4

Карта небезпечних ділянок може використовуватися не лише як ілюстративний матеріал, а як практичний інструмент просторової класифікації післяаварійного стану будівлі. На її основі можна формувати маршрути доступу до осередків пошуку, визначати місця потенційного встановлення тимчасових підпор, а також попередньо оцінювати доцільність входу в окремі функціональні зони будівлі. Для завершення інтерпретації

результатів доцільно співвіднести їх із блок-схемою прийняття рішень.

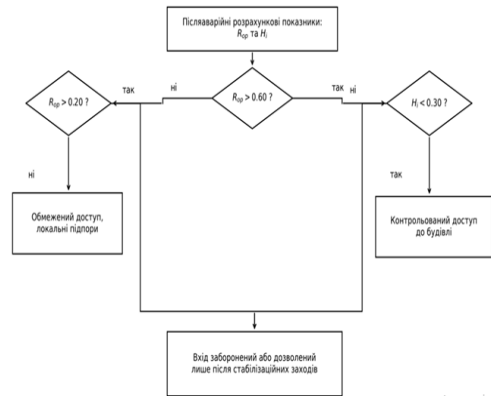


Рисунок 4 – Блок-схема прийняття рішень для пошуково-рятувальних робіт на основі індексу оперативної надійності R_{op} та індексу небезпечності H_i

Узагальнені результати контрольного обчислювального експерименту наведено в табл. 2. Вони свідчать, що зі зростанням пікового тиску та зменшенням тривалості позитивної фази збільшується локальна інтенсивність пошкодження, що зумовлює швидке погіршення залишкової надійності будівлі.

Таблиця 2 – Результати контрольного обчислювального експерименту

Сценарій	Макс. переміщення, мм	D	R _{res}	Ωs	R _{op}	Інженерна інтерпретація
S1	14	0,12	0,93	0,88	0,72	будівля придатна до контрольованого доступу
S2	28	0,24	0,82	0,73	0,45	обмежений доступ, локальні підпори
S3	47	0,41	0,66	0,51	0,20	високий ризик вторинного руйнування
S4	76	0,58	0,47	0,29	0,06	доступ лише для спеціальних аварійних робіт
S5	118	0,74	0,29	0,12	0,01	вхід заборонений, аварійний стан

Дані табл. 2 показують, що перехід від сценарію S1 до S3 супроводжується збільшенням максимального переміщення від 14 до 47 мм, зростанням інтегрального показника пошкодження D від 0,12 до 0,41 та зниженням індексу оперативної надійності R_{op} від 0,72 до 0,20. Це відповідає переходу від режиму контрольованого доступу до стану високого ризику вторинного руйнування. Найрізкіше погіршення спостерігається під

час переходу від S3 до S4: максимальне переміщення зростає на 61,7 %, інтегральне пошкодження – на 41,5 %, коефіцієнт залишкової несучої здатності знижується від 0,66 до 0,47, а індекс оперативної надійності - від 0,20 до 0,06, тобто на 70,0 %.

Узгодження результатів таблиці 2 з блок-схемою на рисунку 4 свідчить, що для сценаріїв S1–S2 доцільним є режим контрольованого або обмеженого доступу з

локальним підсиленням, тоді як для сценаріїв S4–S5 рівень післяаварійної надійності є критично низьким і потребує заборони входу або виконання спеціальних стабілізаційних заходів. Отже, індекс оперативної надійності R_{op} може бути використаний як узагальнений критерій інженерної класифікації стану пошкодженого об'єкта, а карта небезпечних ділянок - як основа для вибору маршрутів доступу та місць установавання тимчасових підпор.

Висновки та напрями подальших досліджень. 1. Виконане обчислювальне дослідження показало, що післяаварійний стан просторової залізобетонної каркасної будівлі істотно залежить від пікового тиску, тривалості позитивної фази та площі локального прикладання імпульсного навантаження. Для сценаріїв S1–S5 максимальні переміщення зросли від 14 до 118 мм, тобто у 8,4 разів.

2. Установлено нелінійне зростання інтегрального показника пошкодження D зі збільшенням інтенсивності локального впливу: від 0,12 для сценарію S1 до 0,74 для сценарію S5, тобто у 6,2 разів. Це відповідає переходу від локального

пошкодження до системної втрати жорсткості окремих елементів і зон будівлі.

3. Показано, що зі зростанням імпульсу навантаження коефіцієнт залишкової несучої здатності R_{res} зменшується від 0,93 до 0,29, тобто на 68,8 %, а індекс оперативної надійності R_{op} – від 0,72 до 0,01, тобто на 98,6 %. Отже, саме R_{op} є чутливішим до погіршення технічного стану і може бути використаний як узагальнений критерій допустимості доступу до пошкодженого об'єкта.

4. Просторовий аналіз за сценарієм S4 засвідчив, що найбільш небезпечні ділянки концентруються на нижніх поверхах у зоні безпосереднього прикладання аварійного впливу та у вертикальному ланцюгу елементів над нею. Це підтверджує доцільність використання карти небезпечних ділянок для планування маршрутів доступу, розміщення тимчасових підпор і вибору безпечної тактики пошуково-рятувальних робіт.

5. Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням будівель з нерегулярною конструктивною схемою, багатофакторних аварійних впливів та з експериментальною валідацією запропонованого підходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2004. 227 p.
2. UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Washington, DC : Department of Defense, 2008.
3. Smith, P., & Hetherington, J. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures* (1st ed.). Oxford : Butterworth-Heinemann. 336 p.
4. Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. Washington, DC : U.S. General Services Administration, 2003. 119 p.
5. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. Washington, DC : U.S. General Services Administration, 2016. 203 p.
6. Ellingwood B. R., Smilowitz R., Dusenberry D. O., Duthinh D., Lew H. S., Carino N. J. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2007. 216 p.
7. FEMA P-2055. Post-disaster Building Safety Evaluation Guidance. Washington, DC : FEMA, 2019. 228 p.
8. ATC-20. Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings. Redwood City, CA : Applied Technology Council, 1989. 152 p.
9. Li, R., Yu, J., & Zhou, X. (2024). A rapid damage assessment framework for regular reinforced concrete frame structures under external explosions. *Structures*. Vol. 68. Article 107104.
10. Отрош Ю., Майборода Р., Рашкевич Н., Ромін А. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. *Механіка та математичні методи*. 2023. Вип. 2. С. 25–40.
11. Майборода Р., Отрош Ю. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 3, вип. 191. С. 485–495.
12. Майборода Р., Отрош Ю., Черпаха Р. Основні причини прогресуючого обвалення залізобетонних будівель. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист* : матеріали XIV Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнародною участю, м. Черкаси, 24–25 жовтня 2024. Черкаси, 2024. С. 52–54.
13. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 121–129.
14. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpunsov V. Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1004. P. 73–83.

REFERENCES

1. European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004).
2. Department of Defense. (2008). UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions.
3. Smith, P., & Hetherington, J. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures* (1st ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann. 336 p. <https://doi.org/10.1201/9781482269277>.
4. U.S. General Services Administration. (2003). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects.
5. U.S. General Services Administration. (2016). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance.
6. Ellingwood, B. R., Smilowitz, R., Dusenberry, D. O., Duthinh, D., Lew, H. S., & Carino, N. J. (2007). Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings (NISTIR 7396). National Institute of Standards and Technology. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7396>.
7. Federal Emergency Management Agency. (2019). FEMA P-2055: Post-disaster building safety evaluation guidance.
8. Applied Technology Council. (1989). ATC-20: Procedures for postearthquake safety evaluation of buildings.
9. Li, R., Yu, J., & Zhou, X. (2024). *A rapid damage assessment framework for regular reinforced concrete frame structures under external explosions*. Structures. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107104>.
10. Otrosh, Yu., Maiboroda, R., Rashkevich, N., & Romin, A. (2023). Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia [Study of methods for progressive collapse analysis]. *Mekhanika ta matematychni metody*, 2, 25–40. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40>.
11. Maiboroda, R., & Otrosh, Yu. (2025). Doslidzhennia metodyky rozrakhunku stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel vnaslidok pozhezhi ta vybukhu [Study of the methodology for calculating resistance to progressive collapse of buildings caused by fire and explosion]. *Komunalne hospodarstvo mist*, 3 (191), 485–495. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-485-495>.
12. Maiboroda, R., Otrosh, Yu., & Cherepakha, R. (2024). Osnovni prychyny prohresuiuchoho obvalennia zalizobetonnykh budivel [Main causes of progressive collapse of reinforced concrete buildings]. *Nadzvychnai sytuatsii: bezpeka ta zakhyst*, materialy XIV Vseukrainskoi naukovy-praktychnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu [Emergencies: Safety and Protection].
13. Skob, Y., Dreval, Y., Vasilchenko, A., & Maiboroda, R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. *Key Engineering Materials*, 952, 121–129. <https://doi.org/10.4028/p-ST1VeT>.
14. Maiboroda, R., Zhuravskij, M., Otrosh, Y., & Karpuntsov, V. (2024). Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. *Key Engineering Materials*, 1004, 73–83. <https://doi.org/10.4028/p-V0xA6H>.

PARAMETRIC COMPUTATIONAL STUDY OF THE POST-ACCIDENT STATE OF A REINFORCED CONCRETE FRAME BUILDING AFTER LOCAL DYNAMIC IMPACT

V. Tomenko, M. Tomenko, R. Melnyk, O. Melnyk

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine

²Kyiv Scientific Research Institute of Forensic Expertise, Ukraine

KEYWORDS: ABSTRACT

reinforced concrete frame building; local dynamic impact; impulsive load; computational experiment; integral damage; residual load-bearing capacity; operational reliability; hazardous zones; civil protection

The article presents the results of a parametric computational study of the post-accident state of a reinforced concrete frame building after a local dynamic impulsive impact. The relevance of the study is determined by the need for rapid and quantitatively justified decisions on access to damaged buildings during search and rescue operations after local blast-type actions. The purpose of the research is to establish patterns of change in the post-accident state of a spatial reinforced concrete frame building depending on the parameters of a local dynamic impulse and to identify hazardous zones in the damaged structural system. The study is based on a direct nonlinear dynamic analysis of a nine-storey building with a regular structural scheme, parametric modelling of five loading scenarios, and reduction of concrete and reinforcement properties in damaged zones. The consequences of the impact are assessed by means of an integral structural damage index, a residual load-bearing capacity coefficient, a structural survivability index, and an operational reliability index. The computational experiment demonstrated a nonlinear deterioration of the structural condition as the impulse intensity increased: the integral damage index grew from 0.12 to 0.74, the residual load-bearing capacity coefficient decreased from 0.93 to 0.29, and the operational reliability index decreased from 0.72 to 0.01. The most severe degradation was observed when the building passed from scenario S3 to S4, which corresponds to the transition from a state of high secondary-failure risk to a critically hazardous state requiring special emergency measures. The spatial analysis showed that the most hazardous zones are concentrated at the lower storeys near the impulse application area and along the vertical chain of elements above the damaged region. The scientific novelty of the work lies in combining local impulse parameters with integral indicators of post-accident performance and a spatial hazard map. The practical value of the study consists in the possibility of using the obtained results to plan access routes, identify locations for temporary strengthening, and substantiate safe search-and-rescue tactics in the civil protection system.