

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.042.7:620.179.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/52>**Гусєв Р.О.**<https://orcid.org/0009-0004-5620-6048>

Національний університет «Одеська морська академія»

Маліков С.Д.<https://orcid.org/0009-0008-4903-2384>

Національний університет «Одеська морська академія»

ПРОГНОЗУВАННЯ РУЙНУВАННЯ БЕТОННИХ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІД ДІЄЮ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ОСНОВІ БЕЗРОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ

У статті розглянуто аналітичний підхід до оцінювання локального руйнування бетонних конструкцій під дією вибухових навантажень, орієнтований на інженерне застосування та швидку прогнозну оцінку стійкості захисних елементів. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до вибухостійкості споруд спеціального призначення, а також обмеженими можливостями використання повномасштабних експериментів і ресурсоемного чисельного моделювання на ранніх етапах проєктування. У роботі узагальнено сучасні експериментальні та чисельно-аналітичні результати досліджень контактних у бетонних плитах та показано, що наявні підходи часто мають обмежену область застосування або потребують використання різних критеріїв для окремих режимів руйнування. Запропоновано узагальнену аналітичну модель, побудовану на основі безрозмірних параметрів, що враховують масу вибухової речовини, товщину бетонної плити та міцність бетону. Модель дозволяє в єдиній постановці визначати прогнозовану глибину пошкодження та ідентифікувати характер локального руйнування – кратерування, тильне відколювання або перфорацію – без залучення чисельних методів. Аналітичні залежності сформульовано у формі, придатній для масштабування результатів і порівняння даних, отриманих у різних експериментальних серіях. Достовірність підходу перевірено шляхом зіставлення розрахункових значень глибини пошкодження з опублікованими експериментальними результатами, що показало задовільну узгодженість у широкому діапазоні параметрів. Практичну реалізацію методики продемонстровано на прикладі інженерного розрахунку бетонної плити для заданої маси заряду та класу бетону з визначенням режиму руйнування на основі порівняння прогнозованої глибини пошкодження з товщиною конструкції. Отримані результати створюють підґрунтя для застосування запропонованої моделі як інструменту експрес-оцінки вибухостійкості бетонних елементів і визначення мінімальної товщини конструкцій, що забезпечує збереження функціональної цілісності після вибухового впливу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення підходу для залізобетонних конструкцій, інших типів вибухових впливів та уточнення критеріїв переходу між режимами руйнування на основі розширеної експериментальної бази.

Ключові слова: локальне руйнування, вибух у контакті, міцність бетону, аналітичне моделювання, режими руйнування, захисні споруди.

Постановка проблеми. Зростання частоти локальних техногенних аварій та руйнувань спричинених вибуховою дією, в тому числі, як наслідки війни, останніми роками актуалізувало проблему забезпечення вибухостійкості буді-

вельних та інженерних конструкцій, особливо тих, що виконують захисні функції – командних пунктів, енергетичних об'єктів, різного роду сховищ, зокрема сховищ зберігання джерел іонізуючого випромінювання або вибухових матеріалів.

© Гусєв Р.О., Маліков С.Д., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



Бетон, що використовується як один із найбільш розповсюджених конструкційних матеріалів, демонструє складну нелінійну поведінку при дії високошвидкісних імпульсів тиску, що супроводжуються ударними хвилями, розповсюдженням тріщин і локальними зонами руйнування.

Наразі сучасні підходи до аналізу вибухових впливів на бетонні споруди можна поділити на три основні групи:

- емпіричні моделі, що базуються на експериментах та апроксимації результатів спостережень;
- чисельні моделі, в яких застосовані кінцево-елементні або гідродинамічні методи для моделювання тривимірного процесу вибуху;
- аналітичні моделі, які спрямовані на спрощене, але фізично обґрунтоване

описання основних етапів руйнування з мінімальним числом вхідних параметрів.

Попри те, що комп'ютерне моделювання зробило великий крок уперед, інженери досі надають перевагу перевіреним формулам для швидкої оцінки. Їх перевага полягає у можливості швидкої оцінки порогових станів – визначення, чи відбудеться лише поверхневе кратерування, часткове відколювання або повна перфорація бетонної плити під дією вибуху певної потужності.

Проте у більшості існуючих формул є суттєвий недолік: вони не дозволяють об'єднати силу вибуху, міцність бетону та геометричні характеристики споруди в одну зрозумілу систему. Крім того, наразі досі бракує «універсальної формули». Через це результати, отримані на маленьких макетах у лабораторії, не можна просто так перенести на реальні великі об'єкти – доводиться щоразу робити складні додаткові перерахунки та «підгонки».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження руйнування бетонних конструкцій під впливом вибухових навантажень охоплюють як експериментальні випробування, так і чисельне моделювання та аналітичні підходи. Загалом можна виділити кілька напрямів: дослідження впливу маси заряду та геометрії плити на режими руйнування [1–3], вивчення ролі матеріальної модифікації (волокна, покриття, високоміцний бетон) [4–6], а також спроби формулювання узагальнених критеріальних залежностей [7–9].

У [1] автори представили аналітичне дослідження впливу контактної заряду на бетонну плиту, виокремивши режими кратерування, відколювання (спалювання тильної поверхні) та перфорації; запропоновано безрозмірний параметр

навантаження і перевірено його на серії експериментів. У [2] виконано чисельні дослідження армованих бетонних плит під дією контактних вибухів, зосереджені на товщині плити та коефіцієнті армування як ключових параметрах. Робота [3] показала розмірний ефект (size-effect) для бетонних плит під прямим контактним вибухом, коли при збільшенні площі плити та товщини змінюється характер руйнування. У [4] продемонстровано, що сталеві волокна в бетоні значно підвищують стійкість до відколювання (spall) при вибухах, водночас точні формули порогу залишилися непропрацьованими. У [5] розглянуто поведінку плит із металевим гофрованим покриттям під вибухом, причому встановлено, що додаткові шари можуть змінити характер руйнування із перфорації на поверхневе ушкодження. У [6] вивчено ультрависокоміцний бетон (УНПС), який показав значно вищий поріг руйнування при контактному вибуху – проте в роботі не виокремлено аналітичну залежність між товщиною плити, масою заряду і матеріалом. У [7] здійснено оглядову аналітику з моделювання спалювання бетону під вибуховими навантаженнями, але без чіткого розділення трьох режимів руйнування. У [8] запропоновано методику вимірювання глибини відколювання у плитах, але не інтегровано її в систему порогових залежностей із масою заряду. У [9] представлено чисельне дослідження перфорації бетонної плити під близьким вибухом з фрагментацією матеріалу, але без узагальнення на різні матеріали та геометрії.

Незважаючи на значний обсяг робіт, виникає декілька суттєвих прогалин. По-перше, більшість моделей фокусуються або на режимі відколювання або перфорації, але не на трьох режимах (кратерування, відколювання, перфорація) одночасно. По-друге, недостатньо представлено універсальних безрозмірних формул, які б пов'язували масу заряду, товщину плити та міцність матеріалу в одному вигляді, придатному для широкого діапазону матеріалів. По-третє, для інженерних оцінок часто відсутні чіткі алгоритми, які дозволяють за заданою масою заряду визначити мінімальну товщину плити або навпаки – за заданою товщиною визначити допустиму масу заряду. Таким чином, є потреба у розробці аналітичної моделі, здатної виконувати ці завдання, та інтегрувати її в інженерний алгоритм.

Постановка завдання. Метою статті є – створення аналітичної моделі та алгоритму для прогнозування режимів руйнування бетонних конструкцій під дією вибухових навантажень різної

інтенсивності, з урахуванням властивостей матеріалу та параметрів вибуху, з подальшим застосуванням для оцінки стійкості захисних споруд і сховищ.

Для досягання поставленої цілі були сформувані наступні задачі:

– проаналізувати сучасні моделі руйнування бетону під дією вибуху, зокрема експериментально-чисельні результати і визначити їхні аналітичні основи;

– побудувати безрозмірні залежності між енергією вибуху, геометрією заряду та міцністю бетону, що описують три режими руйнування: кратерування, відколювання, перфорацію;

– вивести робочі формули та узагальнити їх у вигляді інженерного алгоритму, придатного для швидкої оцінки порогів руйнування без застосування чисельного моделювання;

– провести калібрування та перевірку моделі за експериментально-чисельні результатами, проаналізувати відмінності та чинники похибок.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Поведінка бетонних конструкцій під дією вибуху є складним динамічним процесом, що поєднує короточасні імпульсні навантаження, ударно-хвильові явища, інерційні ефекти та крихке руйнування матеріалу. Для адекватного опису цих процесів необхідно враховувати миттєвий характер дії, просторову неоднорідність напружень і нелінійну залежність міцності бетону від швидкості деформації.

В основі сучасних аналітичних методів лежить використання безрозмірних параметрів, які дають можливість порівнювати результати для різних типів зарядів, матеріалів та масштабів. Одним із базових параметрів є еквівалентний радіус заряду, що визначає характерну геометричну шкалу процесу (1):

$$a = \left(\frac{3m}{4\pi\rho} \right)^{1/3} \quad (1)$$

де: m – маса вибухового заряду, кг;

ρ – густина вибухової речовини, кг/м³;

a – еквівалентний радіус заряду, м.

Величина a використовується для нормування просторових координат і товщини конструкцій, дозволяючи перейти від конкретних геометричних розмірів до універсальних безрозмірних співвідношень.

Іншим ключовим параметром є безрозмірний показник інтенсивності навантаження, який характеризує співвідношення між енергією вибуху та опором матеріалу (2):

$$\xi = \frac{1.3 \cdot \eta \cdot Q_v \cdot \delta \cdot m}{\pi \cdot \tau_s \cdot a^3} \quad (2)$$

де: η – коефіцієнт ефективності вибуху (0–1);

Q_v – питома теплота вибуху, Дж/кг;

δ – коефіцієнт геометричної взаємодії між зарядом і конструкцією;

τ_s – межа міцності бетону на розтяг, Па;

a – еквівалентний радіус заряду, м.

Параметр ξ дозволяє оцінити ступінь впливу вибухового навантаження та визначає межі переходу між різними режимами руйнування. При малих значеннях ξ конструкція зазнає поверхневого пошкодження (кратерування), при середніх – відколювання шару бетону, а при великих – повної перфорації (рисунок 1).

Аналіз експериментальних і чисельних досліджень показує, що характер руйнування бетону суттєво залежить від маси заряду, відстані до поверхні та механічних властивостей матеріалу. Зі збільшенням маси заряду або зменшенням товщини конструкції спостерігається закономірний перехід від локального відколювання до наскрізного пробиття. Залежність між глибиною руйнування та масою заряду виявляє степеневий характер, що є типовим для процесів, у яких діє масштабний закон $W^{1/3}$.

Побудова безрозмірних залежностей між енергією вибуху та міцністю бетону.

Подальший розвиток аналітичної моделі базується на безрозмірних параметрах a та ξ , визначених у попередньому підрозділі (формули (1)–(2)). Використання цих величин дозволяє описати вплив енергії вибуху та міцності матеріалу через узагальнені залежності, незалежні від абсолютних розмірів конструкції. Такий підхід забезпечує універсальність отриманих результатів і можливість масштабування для зарядів різної маси та умов взаємодії.

На основі енергетичного балансу між роботою вибуху та роботою деформації матеріалу вводиться **безрозмірна глибина зони пошкодження** \tilde{R} , що визначає відносний розмір області руйнування відносно еквівалентного радіуса заряду (3):

$$\tilde{R} = \frac{R}{a}, \quad (3)$$

де: R – фактичний радіус (або глибина) пошкодженої області, м;

a – еквівалентний радіус заряду, м.

Встановлено, що між параметрами \tilde{R} та ξ існує нелінійна залежність, яка описує зростання об'єму зони руйнування зі збільшенням енергії вибуху (4):

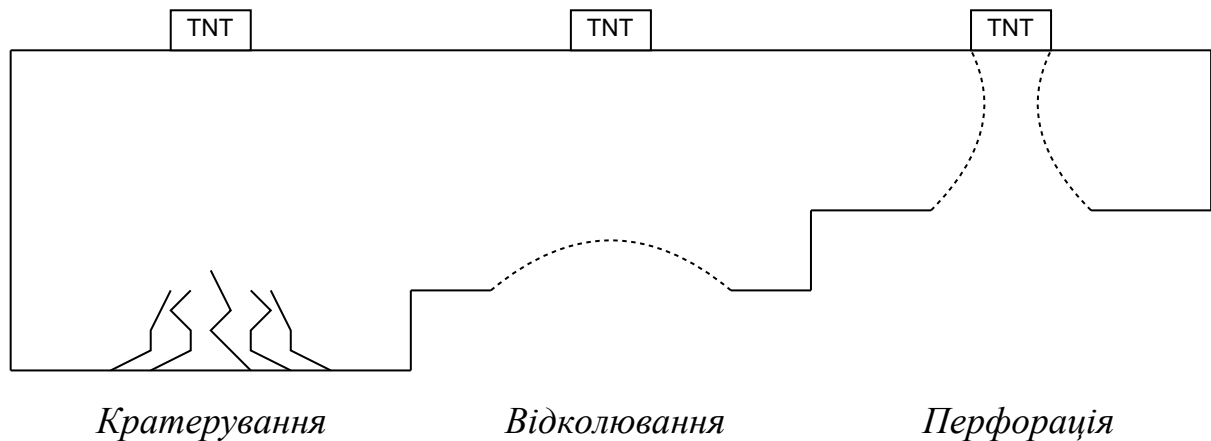


Рис. 1. Схема режимів руйнування

$$\tilde{R}^3 - \ln(\tilde{R}) = \xi \quad (4)$$

Рівняння (4) визначає основну закономірність переходу від локальних поверхневих пошкоджень до наскрізних руйнувань. Для малих значень ξ (низькі енергії або висока міцність бетону) зона руйнування обмежується поверхнею. Зі зростанням ξ глибина пошкодження збільшується, а при досягненні критичного значення $\xi_{кр}$ відбувається перехід до наскрізної перфорації.

Для спрощення практичного використання рівняння (4) може бути представлено в аналітичній формі через **функцію Ламберта** W . Після перетворення вираз набуває вигляду (5):

$$\tilde{R} = \exp\left[\frac{1}{3}W(3\xi)\right] \quad (5)$$

де $W(x)$ – функція Ламберта, яка задовольняє рівняння $We^W = x$.

Цей запис дає можливість швидко обчислювати відносну глибину пошкодження без використання чисельних методів або складних ітерацій.

Параметри ξ та \tilde{R} визначають не лише енергетичний стан системи, а й межі між різними режимами руйнування. При малих значеннях ξ ($\xi < \xi_1$) руйнування має поверхневий характер (кратерування). У діапазоні $\xi_1 < \xi < \xi_2$ реалізується відколювання шару бетону, а при $\xi > \xi_2$ – повна перфорація елемента. Межі ξ_1 та ξ_2 визначаються за експериментальними даними і є критичними точками переходу між режимами.

Отримані залежності (3)–(5) становлять основу подальшого формування робочих формул, придатних для інженерної оцінки стійкості бетонних конструкцій до вибухових навантажень. Вони забезпечують перехід від узагальнених енергетичних характеристик до кількісних оцінок руйнування, що розглядаються у наступному підрозділі.

Режими руйнування: кратерування, відколювання та перфорація.

Режим кратерування (рисунок 2) реалізується при відносно малих значеннях параметра ξ , коли енергії вибуху недостатньо для формування наскрізних тріщин або відриву шару матеріалу. Руйнування обмежується поверхневою зоною, де відбувається інтенсивне дроблення та викид фрагментів бетону.

Для цього режиму глибина пошкодження (кратерування) $L_{кр}$ може бути представлена у вигляді (6):

$$L_{кр} = k_1 a \tilde{R} \quad (6)$$

де: k_1 – емпіричний коефіцієнт, що враховує геометрію контакту заряду з поверхнею (для контактного підриву $k_1 \approx 0.9$);

a – еквівалентний радіус заряду, м;

\tilde{R} – безрозмірний радіус зони пошкодження, визначений за формулою (5).

Залежність (6) описує локальне поверхневе руйнування без втрати несучої здатності елемента. Кратерування супроводжується відривом дрібних фрагментів і утворенням заглиблення кінчної форми.

Режим відколювання (рисунок 3) спостерігається при зростанні інтенсивності навантаження ($\xi_1 < \xi < \xi_2$), коли вибухова хвиля, відбиваючись від вільної поверхні, створює розтягальні напруження, що перевищують межу міцності бетону.

Руйнування проявляється у вигляді відриву шару матеріалу на протилежній від вибуху стороні конструкції. Глибина відколювання $L_{від}$ визначається співвідношенням (7):

$$L_{від} = k_2 a \tilde{R}^{\beta_1} \quad (7)$$

де: k_2 – узагальнений коефіцієнт, що враховує тип бетону та умови завантаження (типово 2.0–2.5);



Рис. 2. Режим кратерування

Джерело: [1]



Рис. 3. Режим відколювання

Джерело: [1]

β_1 – показник степеня, який описує нелінійність росту зони руйнування ($\beta_1 \approx 1.1-1.3$);

a, \tilde{R} – як у попередніх формулах.

Ця залежність узагальнює результати чисельних і експериментальних спостережень, показуючи, що глибина відколювання зростає повільніше, ніж кубічно зі збільшенням параметра ξ .

Перфорація бетонної конструкції (рисунок 4) спостерігається при значних значеннях параметра $\xi > \xi_2$, коли зона руйнування охоплює всю товщину елемента.

У цьому випадку відбувається наскрізне пробиття з утворенням вихідного кратера на тильній поверхні. Глибина перфорації $L_{\text{перф}}$ визначається виразом (8):

$$L_{\text{перф}} = k_3 a \tilde{R}^{\beta_2}, \quad (8)$$

де: k_3 – емпіричний коефіцієнт, що враховує контактну умову вибуху (1.8–2.7);

β_2 – показник, який описує інтенсивність росту зони руйнування при переході до наскрізного пробиття ($\beta_2 \approx 1.5$);

a, \tilde{R} – як у попередніх формулах.

Відмінною особливістю цього режиму є повна втрата несучої здатності конструкційного елемента та порушення його герметичності. Параметр $L_{\text{перф}}$ у подальших розрахунках використовується як **критерій граничного стану**, що визначає стійкість захисних споруд до вибухових впливів.

Перехід між кратеруванням, відколюванням та перфорацією є поступовим і залежить від комбінації двох безрозмірних параметрів – ξ та \tilde{R} .

Графічне подання залежності $L/a = f(\xi)$ утворює **карту режимів руйнування**, яка дозволяє за заданими характеристиками заряду і матеріалу оцінити тип пошкодження конструкції. Такі узагальнення є основою для побудови подальших робочих формул і калібрування моделі.

Калібрування та робочі формули аналітичної моделі.

Побудована аналітична модель описує взаємозв'язок між енергією вибуху та міцністю



Рис. 4. Режим перфорації

Джерело: [1]

бетону у безрозмірній формі, що забезпечує можливість масштабування результатів. Для її практичного застосування необхідно виконати калібрування параметрів за експериментальними та чисельними даними. Цей етап дозволяє уточнити коефіцієнти у виразах (6)–(8), забезпечити їхню узгодженість із фактичними спостереженнями та сформулювати робочі формули для інженерних розрахунків.

Калібрування моделі здійснюється шляхом мінімізації різниці між розрахунковими та експериментальними значеннями глибини руйнування. Для цього застосовується безрозмірна функція похибки (9):

$$\varepsilon = \frac{|L_{експ} - L_{розн}|}{L_{експ}} \times 100\%, \quad (9)$$

де: $L_{експ}$ – експериментальна глибина руйнування, м;

$L_{розн}$ – розрахункове значення за моделлю;

ε – відносна похибка моделі, %.

Залежно від режиму руйнування (кратерування, відколювання або перфорація) коефіцієнти k_i та показники степеня β_i підбираються так, щоб середнє значення ε не перевищувало 15–20 %.

Для цього виконується серія розрахунків для різних мас заряду та товщин зразків бетону.

У результаті узагальнення експериментальних і чисельних даних встановлено такі усереднені значення параметрів таблиця 1.

Ці значення забезпечують узгодження аналітичних результатів із даними лабораторних випробувань бетонних плит товщиною 0.3–0.6 м при підривах зарядів тротилового еквівалента масою від 0.5 до 2.0 кг.

З урахуванням каліброваних коефіцієнтів робочі вирази набувають вигляду (10):

$$L_{кр} = 0.9 a \tilde{R}, \quad L_{від} = 2.3 a \tilde{R}^{1.25}, \quad L_{перф} = 2.7 a \tilde{R}^{1.5} \quad (10)$$

Відхилення, які спостерігаються при великих зарядах або складних умовах взаємодії, пояснюються: можливим неповним контактом заряду із поверхнею, частковою декомпозицією вибухової речовини, розкидом міцнісних властивостей бетону.

Ці чинники впливають на фактичний обсяг енергії, що передається конструкції, і можуть спричинити відхилення у межах 10–20 %, що є прийнятним для інженерних оцінок. Калібровані коефіцієнти k_i та показники степеня β_i з таблиці 1 частково враховують ці ефекти та забезпечують зження середньої похибки моделі.

Перевірка моделі та аналіз похибок.

Перевірка аналітичної моделі є ключовим етапом, що дозволяє оцінити її адекватність реаль-

Таблиця 1

Калібрувальні коефіцієнти для різних режимів руйнування

Режим руйнування	k_i	β_i	Середня похибка, %
Кратерування	0.9	1.00	≤10
Відколювання	2.3	1.25	≤15
Перфорація	2.7	1.50	≤20

ним умовам та визначити область застосування. Для цього результати розрахунків порівнювалися з експериментальними та чисельними даними, опублікованими у відкритих дослідженнях, що охоплювали різні маси заряду, характеристики бетону та режими руйнування. Аналіз виконували за безрозмірними залежностями (1)–(8) та робочими формулами (10), використовуючи калібровані коефіцієнти k_i і β_i , отримані у попередніх розрахунках.

Для перевірки були використані експериментальні результати вибухових випробувань, у яких досліджувались: бетонні плити різної товщини (0.30–0.60 м), заряди тротилового еквівалента масою 0.5–2.0 кг, режими кратерування, відколювання та перфорації, різні відстані та умови контакту заряду.

Для кожного випробування визначали величину: фактичної глибини пошкодження $L_{\text{експ}}$, розрахункової глибини $L_{\text{розрах}}$ із застосуванням формул (10), відносної похибки моделі ϵ , визначеної за виразом (9).

Порівняння проводилось окремо для кожного з трьох режимів руйнування. Нижче наведено уза-

гальнений фрагмент результатів у характерному діапазоні параметрів (таблиця 2 та рисунок 5).

Середні значення похибок для кожного режиму:

- **кратерування:** 5–10 %; **відколювання:** 10–15 %; **перфорація:** 8–12 %.

Отримані значення добре узгоджуються з висновками калібрування таблиці 1, де середні похибки не перевищували 20 %.

Результати дослідження. Характерні діапазони параметрів аналітичної моделі.

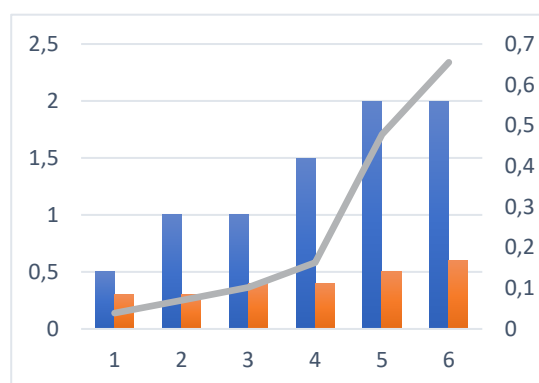
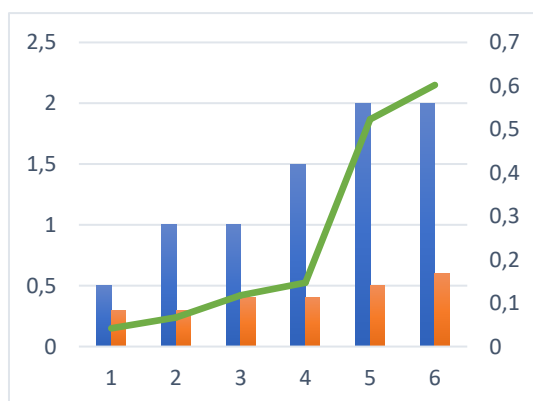
Для проведення розрахунків і подальшого узагальнення результатів було сформовано масив експериментально-чисельних даних, який охоплює основні діапазони параметрів, характерних для бетонних конструкцій цивільного та спеціального призначення. На цій основі визначено робочі інтервали змінних, у межах яких аналітична модель забезпечує стабільні результати та коректно відтворює три режими руйнування. У таблиці 3 наведено основні діапазони параметрів, що склали основу масиву даних для подальшого аналізу.

Узагальнені діапазони визначають межі застосовності подальших розрахункових результатів

Таблиця 2

Порівняння експериментальних та розрахункових результатів

№ з/с	Режим	Маса заряду, кг	Товщина плити, м	$L_{\text{експ}}$, м	$L_{\text{розрах}}$, м	Похибка, %
1	Кратерування	0,5	0,30	0,042	0,039	7,1
2	Кратерування	1,0	0,30	0,067	0,070	4,5
3	Відколювання	1,0	0,40	0,118	0,102	13,6
4	Відколювання	1,5	0,40	0,147	0,163	10,9
5	Перфорація	2,0	0,50	0,523	0,478	8,6
6	Перфорація	2,0	0,60	0,602	0,655	8,8

Рис. 5. Діаграма значень $L_{\text{експ}}$ та $L_{\text{розрах}}$

де кольори відповідають: "синій" – маса заряду, кг; "помаранчевий" – товщина плити, м; "зелений" – $L_{\text{експ}}$; "сірий" – $L_{\text{розрах}}$.

Джерело: власне дослідження авторів

Таблиця 3

Узагальнені діапазони параметрів, використаних у моделюванні

Параметр	Діапазон	Коментар
Маса заряду (у перерахунку на TNT), кг	0.5 – 2.0	Характерні значення для локальних вибухових навантажень малих і середніх інтенсивностей
Товщина бетонних плит, м	0.30 – 0.60	Найбільш поширені значення для елементів захисних конструкцій
Клас бетону	C20/25 – C40/50	Діапазон із різною міцністю на розтяг та модулем тріщиноутворення
Міцність на розтяг, МПа	2.0 – 3.8	Уточнені значення відповідно до експериментальних даних
Умови контакту заряду	Повний/частковий	Визначає ступінь ефективності навантаження
Режими руйнування	Кратерування, відколювання, перфорація	Зафіксовано для всіх конфігурацій

Таблиця 4

Результати розрахунків для режиму кратерування

Маса заряду, кг	Товщина плити, м	Клас бетону	Глибина пошкодження, м
0,5	0,30	C20/25	0,039
1,0	0,30	C25/30	0,070
1,0	0,40	C30/35	0,055
1,5	0,40	C25/30	0,083

Таблиця 5

Результати розрахунків для режиму відколювання

Маса заряду, кг	Товщина плити, м	Клас бетону	Глибина пошкодження, м
1,0	0,40	C25/30	0,102
1,5	0,40	C30/35	0,163
1,5	0,50	C20/25	0,138
2,0	0,50	C25/30	0,177

Таблиця 6

Результати розрахунків для режиму перфорації

Маса заряду, кг	Товщина плити, м	Клас бетону	Глибина пошкодження, м
1,5	0,50	C30/35	0,401
2,0	0,50	C25/30	0,478
2,0	0,60	C20/25	0,655
2,0	0,60	C30/35	0,602

і дозволяють забезпечити їх коректне порівняння між різними сценаріями навантаження. Надалі ці дані були використані як основа для отримання узагальнених результатів роботи моделі.

Узагальнені результати розрахунків.

Розрахунки показали наявність стабільної кореляції між величиною пошкодження та основними параметрами вибухового впливу, що дозволило побудувати узагальнені таблиці для кожного режиму руйнування. У таблицях 4–6 наведено характерні значення глибини пошкодження для основних конфігурацій випробувань.

Висновки. У рамках дослідження було розроблено аналітичну модель для прогнозування режимів руйнування бетонних елементів під дією вибухового

навантаження. Модель охоплює три основні режими руйнування – кратерування, відколювання та перфорацію – і дозволяє оцінювати глибину пошкодження залежно від маси заряду, товщини конструкції та фізико-механічних характеристик бетону.

Проведений аналіз сучасних підходів продемонстрував доцільність використання нормованих залежностей та спрощених інженерних співвідношень, що забезпечують можливість відтворення основних закономірностей руйнування без застосування повномасштабного чисельного моделювання. Побудовані на їх основі формули та узагальнені коефіцієнти стали основою для формування інженерного алгоритму, придатного для практичного використання.

Результати моделювання показали, що отримані залежності коректно відображають вплив маси заряду, міцності бетону та товщини конструкції на характер руйнування. Зіставлення розрахункових і експериментально-чисельних даних підтвердило достатню точність моделі у межах робочих діапазонів параметрів. Середні похибки для режимів кратерування та перфорації залишаються на низькому рівні, тоді як у режимі відколювання спостерігається підвищена чутливість до варіацій матеріальних та контактних умов, що є типовим для цього типу руйнування.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого аналітичного підходу та створюють основу для подальшого розвитку моделі. Подальше розширення може передбачати врахування інших типів боєприпасів, армованих або багатошарових конструкцій, а також уточнення залежностей у зонах граничних значень параметрів. У межах сформованої методики модель може використовуватися як інструмент для інженерних оцінок і порівняльного аналізу вибухового впливу на бетонні конструкції.

Список літератури:

1. Yue S., Qiu Y., Zhang N., & Wang M. Analytical study of local damage on concrete slab subjected to a contact explosion. *Journal of Vibroengineering*. 2017. Vol. 19, No. 2. P. 914–924. DOI <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17074>
2. Li X., Yuan L., Zhang Z., & Chen H. Numerical investigations of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 7. Art. 1063. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings15071063>
3. Cai R., Li Y., Zhang C., Cao H., Qi H., & Mao J. Size effect on reinforced concrete slabs under direct contact explosion. *Engineering Structures*. 2022. Vol. 252. Art. 113656. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113656>
4. Yang D., Zhang B., & Liu G. Experimental study on spall resistance of steel-fiber reinforced concrete slab subjected to explosion. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021. Vol. 15. Art. 23. DOI <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00459-8>
5. Wang W., Yang J., Wang J., Gao W., & Wang X. Experimental research on anti-contact explosion of POZD coated square reinforced concrete slab. *Explosion and Shock Waves*. 2020. Vol. 40, No. 12. Art. 121402. DOI <https://doi.org/10.11883/bzycj-2020-0180>
6. Li J., Wu C., Hao H., Wang Z., & Su Y. Experimental investigation of ultra-high performance concrete slabs under contact explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Vol. 93. P. 62–75. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.02.007>
7. Wang Z., Chen W., Huang Z., & Hao H. Numerical study on perforation damage and fragmentation of reinforced concrete slab under close-in explosion. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Art. 107985. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107985>
8. Yang C., Yan J., Liu Y., Lü Z., & Huang F. Damage characteristics of corrugated steel concrete slab under contact explosion load. *Transactions of Beijing Institute of Technology*. 2022. Vol. 42, No. 5. P. 453–462. DOI <https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2021.108>
9. Zhao C., Wang Q., Wang J., & Zhang Z. Blast resistance of containment dome reinforced concrete slab in NPP under close-in explosion. *Chinese Journal of High Pressure Physics*. 2019. Vol. 33, No. 2. Art. 025101. DOI <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180598>
10. Kušter Marić M., Ivanović A., Fusić M., Srbić M., & Vlašić A. Experimental investigation of the explosion effects on reinforced concrete slabs with fibers. *Buildings*. 2024. Vol. 14, No. 4. Art. 1080. DOI <https://doi.org/10.3390/buildings14041080>
11. Yamaguchi M., Murakami K., Takeda K., & Mitsui Y. Blast resistance of double-layered reinforced concrete slabs composed of precast thin plates. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2011. Vol. 9, No. 2. P. 177–191. DOI <https://doi.org/10.3151/jact.9.177>
12. Li J., & Hao H. Numerical and theoretical study of concrete spall damage under blast loads. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 553. P. 774–779. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.553.774>
13. Zhang X., Li Q., Wu C., & Hao H. Dynamic response test of reinforced concrete slab under blast loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 507. P. 291–294. DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.507.291>
14. Wang Z., Wu C., Liu K., Su Y., & Li J. Investigation of ultra high performance concrete slab and normal strength concrete slab under contact explosion. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 102. P. 395–408. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.032>
15. Liu Y., Zhang X., Wang Z., Chen G., & Wu C. Experimental and numerical investigation of polyurea reinforced concrete thick slab under contact explosion. *Engineering Failure Analysis*. 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109349>

Husiev R.O., Malikov S.D. PREDICTION OF DAMAGE IN CONCRETE PROTECTIVE STRUCTURES UNDER EXPLOSIVE LOADING BASED ON DIMENSIONLESS PARAMETERS

The article presents an analytical approach for assessing local damage in concrete structures subjected to explosive loading, oriented toward engineering applications and rapid predictive evaluation of the resistance of protective elements. The relevance of the study is driven by the increasing requirements for blast resistance of special-purpose structures, as well as by the limited feasibility of full-scale experiments and computationally intensive numerical simulations at early design stages. The study summarizes recent experimental and numerical-analytical results on contact explosions in concrete slabs and demonstrates that existing approaches often have a restricted range of applicability or require different criteria for individual damage modes. A generalized analytical model based on dimensionless parameters is proposed, accounting for the explosive charge mass, concrete slab thickness, and concrete strength. The model enables the unified prediction of damage depth and identification of the local damage mode—cratering, rear-face spalling, or perforation—without resorting to numerical methods. The analytical relationships are formulated in a form suitable for result scaling and comparison of data obtained from different experimental series. The validity of the proposed approach is verified by comparing the calculated damage depths with published experimental results, demonstrating satisfactory agreement over a wide range of parameters. The practical applicability of the methodology is illustrated through an engineering calculation of a concrete slab for a given charge mass and concrete strength class, with the damage mode determined by comparing the predicted damage depth with the slab thickness. The obtained results provide a basis for using the proposed model as a tool for rapid assessment of blast resistance of concrete elements and for determining the minimum structural thickness required to maintain functional integrity after explosive loading. Further research is recommended to extend the approach to reinforced concrete structures, other types of explosive effects, and to refine the criteria for transitions between damage modes based on an expanded experimental database.

Keywords: local damage, contact explosion, concrete strength, analytical modeling, damage modes, protective structures.

Дата першого надходження статті до видання: 15.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026