

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-18>

УДК 624.012.45:624.042

БІЛЯЄВ МИКИТА

Київський національний університет будівництва та архітектури

<https://orcid.org/0009-0000-1027-9285>

e-mail: biliaiev_ma-2024@knuba.edu.ua

ТОВЩИНИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПО КРИТЕРІЮ ПРОБИТТЯ ВІД ВИБУХУ НА МАЛИХ ВІДСТАНЯХ ПРИ СТАНДАРТНИХ РІВНЯХ АРМУВАННЯ

У статті досліджено вибухову стійкість залізобетонних плит перекриттів за дії близького вибуху зарядів масою 50, 75 та 100 кг у тротиловому еквіваленті. Актуальність роботи зумовлена необхідністю врахування визначених аварійних ситуацій під час проектування будівельних конструкцій в умовах підвищених ризиків вибухових впливів. Основну увагу приділено локальному пошкодженню, пробиттю та визначенню мінімальної товщини плит. Аналіз досліджень показує, що реакція конструкцій залежить від маси заряду, відстані до плити, її товщини, властивостей бетону та армування [1, 2]. При близьких вибухах визначальними є локальні механізми руйнування, зокрема відколювання, розшарування, фрагментація та пробиття [3, 4, 5].

Дослідження виконано методом чисельного моделювання у програмному комплексі ANSYS. Розглянуто плити розміром 6×6 м із бетону C35/45 та арматури B500B. Основна серія моделей передбачала двошарове армування стержнями діаметром 10 мм із кроком 150 мм в обох напрямках. Досліджено товщини плит 150–500 мм, заряди 50, 75 і 100 кг та відстані від точки детонації до поверхні 0,5; 1,0; 1,5 та 2,0 м. Порівняння Ейлерівської та Лагранжівської постановок показало перевагу Ейлерівської моделі для відтворення вибухової хвилі та локального руйнування. Встановлено, що двостороннє армування є значно ефективнішим для збереження цілісності плити.

За результатами моделювання визначено мінімально рекомендовані товщини плит, що забезпечують відсутність пробиття. Для зарядів 50, 75 та 100 кг при відстані 0,5 м вони становлять відповідно 250, 300 та 350 мм; при 1,0 м — 200, 200 та 250 мм; при 1,5 м — 150, 200 та 200 мм. Для відстані 2,0 м достатньою є товщина 150 мм для всіх досліджених зарядів. Основними критеріями відмови по матеріалу прийнято граничні відносні деформації 0,0035 для бетону та 0,05 для арматурної сталі. Водночас відсутність пробиття не виключає локального розтріскування, викишування та деформування плити.

Отримані результати можуть бути використані для попереднього вибору товщини залізобетонних плит при проектуванні конструкцій, що мають сприймати близькі вибухові впливи. Результати також плануються застосувати як вихідні параметри для подальшого дослідження комбінованих перекриттів по сталевих балках із перфорованими стінками при дії ударно-вибухового впливу [6, 7].

Ключові слова: залізобетонна плита; вибух; пробиття; товщина плити; механізм руйнування

BILIAIEV MYKYTA

Kyiv National University of Construction and Architecture

TYPICALLY REINFORCED CONCRETE SLAB THICKNESS REQUIRED TO PREVENT PERFORATION FROM CLOSE-RANGE BLASTS

This study investigates blast resistance of reinforced concrete floor slabs subjected to close-range explosions of 50, 75, and 100 kg TNT-equivalent charges. The relevance of the study is determined by a need to consider specific accidental blast scenarios in structural design under increased explosion risks. Particular attention is paid to local damage, perforation, and determination of the minimum slab thickness. Previous studies have shown that the structural response is governed by the charge mass, stand-off distance, slab thickness, concrete properties, and reinforcement properties [1, 2]. Under close-range blast loading, local failure mechanisms such as spalling, scabbing, fragmentation, and perforation become particularly critical [3, 4, 5].

The study was conducted using numerical modelling in the ANSYS software package. The study considered 6×6 m reinforced concrete slabs made of C35/45 concrete and reinforced with B500B bars. The primary series of numerical models included two layers of 10 mm diameter reinforcing bars spaced at 150 mm in both directions. Slab thicknesses of 150–500 mm, explosive charge masses of 50, 75, and 100 kg, and stand-off distances of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m from the detonation point to the slab surface were considered. Comparison of the Eulerian and Lagrangian formulations indicated that the Eulerian approach is preferable for modelling blast-wave propagation and local damage. It was concluded that two layers of reinforcement are significantly more effective in maintaining slab integrity.

The simulations determined the minimum slab thicknesses required to prevent perforation. For charges of 50, 75, and 100 kg at a stand-off distance of 0.5 m, the required thicknesses were 250, 300, and 350 mm, respectively; at 1.0 m, 200, 200, and 250 mm; and at 1.5 m, 150, 200, and 200 mm. At 2.0 m stand-off distance, a thickness of 150 mm is sufficient for all charges considered. The primary material failure criteria were limiting strains of 0.0035 for concrete and 0.05 for reinforcing steel. Nevertheless, the prevention of perforation does not rule out local cracking, spalling, or permanent slab deformation.

Obtained results may be used to preliminary determine reinforced concrete slab thickness when designing structures exposed to close-range blast loading. They will also provide input parameters to further study hybrid floor systems with steel castellated beams subjected to combined impact and blast actions [6, 7].

Keywords: reinforced concrete slab; blast; perforation; slab thickness; failure mechanism.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.08.2026

Прийнята до друку / Accepted 24.09.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Біляєв Микита

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Наразі одним з основних викликів при будівництві в Україні є стійкість до вибухів та живучість конструкцій. З точки зору вибухів є певні найрозповсюдженіші загрози. Серед таких безпілотні літальні апарати (БПЛА) з бойовою частиною від 50 до 100 кг у тротиловому еквіваленті. На момент написання даної статті прикладами цієї категорії БПЛА, що є загрозами для України зі сторони ворога є: БПЛА Shahed-136/Герань-2 (бойова частина 40-90 кг), БПЛА Shahed-238/Герань-3 (бойова частина 40-90 кг), БПЛА Бандероль (бойова частина 50-100 кг) тощо. З точки зору проектування будівельних конструкцій такі загрози можна віднести до визначених аварійних ситуацій. Основним методом врахування визначених аварійних ситуацій є безпосередній розрахунок на відповідні навантаження/впливи. Для цього на початкових етапах важливо конструктивно закласти адекватні геометричні параметри елементів, що будуть відповідати рівню та інтенсивності потенційних загроз. Одним з таких параметрів є товщини плит перекриття. У рамках даної статті буде визначено товщини залізобетонних плит достатні для уникнення пробиття зарядами у 50-100 кг тротилу при стандартних рівнях армування і міцності бетону.

В рамках статті заряди еквівалентні бойовим частинам таких загроз як ракети (200-1000 кг вибухової) не розглядалися. Закладати у конструкції збереження цілісності при прямому влучанні ракетного озброєння економічно не доцільно. Ракети мають не тільки значно більші бойові частини, а і кінетичну енергію. Як виключення можуть розглядатися підземні захисні споруди для людей і дороговартісного обладнання. У інших випадках раціональним може бути розрахунок на вибух ракети на певному віддаленні, а дрона – близько до поверхні конструкції. Ініціювати вибух ракети на певній відстані від об'єкта – задача протиповітряної оборони (ППО), засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) та інших систем активного захисту.

Публікація не розглядає такі додаткові фактори ураження як кумулятивні, уламкові або термобаричні заряди, що може стати метою окремих досліджень. З точки зору пробиття найбільш актуальним є кумулятивний ефект. Для плит товщиною до 500мм, що розглядаються даною публікацією, сама орієнтованість подібних зарядів на пробиття та принцип направленої дії, у більшості випадків, означатиме відносно невелике локальне пробиття.

Аналіз досліджень та публікацій

Дослідження вибухової стійкості залізобетонних конструкцій у сучасній науковій літературі можна умовно поділити на три основні напрями: експериментальне дослідження поведінки плит при близьких і повітряних вибухах, чисельне моделювання вибухової дії та оцінювання фактичних пошкоджень будівель після вибухових впливів.

Узагальнюючі статті за тематикою вибухової стійкості залізобетонних конструкцій [1, 2] систематизують результати експериментальних, аналітичних і чисельних досліджень та виділяють основні фактори, що визначають реакцію плит при вибуховому навантаженні. До них належать маса вибухового заряду, відносна відстань, товщина плити, міцність бетону, коефіцієнт армування, схема спірання та характеристики вибухової хвилі. У роботах відзначається, що при збільшенні відстані від заряду характер роботи конструкції поступово змінюється від переважно локального руйнування до глобальної згинальної відповіді. Для близьких і контактних вибухів характерними є утворення кратера, розшаровування, розколювання, дроблення бетону, локальне пробивання та пошкодження арматури, тоді як при більших масштабних відстанях основним критерієм оцінювання часто виступає максимальний прогин плити [1, 2].

Експериментальні дослідження залізобетонних плит при вибухових впливах [3, 4, 8–10] охоплюють контактні, близькі та повітряні вибухи з різними масами заряду та відстанями до конструкції. Встановлено закономірне збільшення інтенсивності пошкодження зі збільшенням маси заряду та зменшенням відстані до плити. Результати випробувань однопротитних плит показують, що при близьких вибухах поряд із глобальним згинанням виникають локальні пошкодження бетону, які можуть визначати подальшу несучу здатність конструкції [3, 4]. Дослідження масштабного ефекту [8] показали, що макроскопічний характер руйнування плит різного розміру може бути подібним, однак локальні параметри пошкодження не завжди підпорядковуються простим масштабним залежностям. Тому безпосереднє перенесення результатів маломасштабних випробувань на натурні конструкції потребує додаткового обґрунтування.

Окремо досліджувався вплив конструктивних параметрів залізобетонних плит. Експериментальні та чисельні результати [9] показують, що збільшення коефіцієнта армування сприяє зменшенню максимального прогину та локального пошкодження, а також підвищує здатність плити зберігати несучу здатність після виникнення тріщин. Повномасштабні випробування [4] підтверджують суттєвий вплив типу бетону та армування на характер пошкодження. Застосування фібробетону та високоміцного бетону, за результатами досліджень [10], дозволяє обмежити локальне руйнування, відколювання та фрагментацію бетону, особливо при контактному вибуху. Разом із тим ефективність підвищення міцності матеріалу залежить від характеру вибухового впливу та співвідношення локальної і глобальної складових роботи конструкції.

Чисельне моделювання вибухової дії на залізобетонні плити розглянуто у значній кількості досліджень [4, 11–15]. Для детального відтворення процесу детонації та поширення вибухової хвилі застосовуються Ейлеровський, Лагранжівський, ALE та CEL-постановки задачі, а також моделі взаємодії рідини або газу з конструкцією. Чисельні дослідження [11, 12] показали, що для прогнозування локального пошкодження необхідно враховувати нелінійну поведінку бетону, його руйнування та зниження жорсткості. Для інженерних

розрахунків застосовуються також спрощені моделі, зокрема приведення до моделі з одним ступенем вільності, які дають змогу оцінювати глобальну реакцію та максимальний прогин, але мають обмежені можливості щодо прогнозування локального руйнування [4].

При чисельному моделюванні важливе значення має вибір моделі матеріалу бетону, параметрів руйнування, розміру скінченного елемента, способу представлення арматури та характеру контакту між компонентами. Порівняння розрахункових і експериментальних результатів [4] показує можливість відтворення основних форм пошкодження — утворення кратера, розшарування, розколювання, згинального та згинально-зсувного руйнування. Водночас точність прогнозування локальних пошкоджень істотно залежить від калібрування матеріальної моделі та параметрів чисельної схеми.

Можна виділити групу робіт присвячену саме локальному руйнуванню [5, 15], в яких зокрема досліджуються механізми розшарування [15] та фрагментація залізобетонних плит [5]. Експериментальні дослідження фрагментації залізобетонних плит при близьких вибухах [5] показують, що навіть при збереженні загальної цілісності плити локальне відколювання бетону може створювати значну кількість небезпечних уламків. Тому оцінювання вибухової стійкості доцільно проводити не лише за загальними ефектами як максимальний прогин чи приведені напруження, але й за характером локального пошкодження, залишковою несучою здатністю та можливістю утворення фрагментів.

Значна частина українських публікацій останніх років присвячені оцінюванню фактичних пошкоджень будівель і залізобетонних конструкцій після ударно-вибухових впливів [16–19]. Вони значною мірою доповнюють результати закордонних робіт натурними даними про поведінку будівель, які зазнали реальних вибухових впливів. Для визначення ступеня пошкодження застосовуються візуальне обстеження, неруйнівний контроль, ультразвукові методи, визначення фактичної міцності бетону та перевірочні розрахунки. Дослідження монолітних плит перекриттів після вибухової дії показують нерівномірний розподіл пошкоджень по товщині та площі конструкції [16]. Це свідчить про необхідність комплексного оцінювання технічного стану, оскільки зовнішні прояви пошкодження не завжди відображають фактичний стан внутрішніх шарів бетону та арматури. Роботи з оцінювання та відновлення пошкоджених залізобетонних конструкцій [17] передбачають поєднання результатів натурального обстеження з перевірочним скінченно-елементним розрахунком. Такий підхід дозволяє визначити залишкову несучу здатність та обґрунтувати необхідність підсилення окремих елементів. Рекомендації щодо конструктивних рішень [18] додатково акцентують увагу на зонах спирання плит, де після локального пошкодження може виникати продавлювання та порушення передачі зусиль на вертикальні елементи. Для чисельного моделювання та порівняння чисельних і експериментальних результатів окрім закордонних використовуються вітчизняні програмні комплекси як Lira-FEM [13, 14, 19]. Інший напрям представлений дослідженнями параметрів вибухової ударної хвилі та методів їх визначення для подальшого використання в розрахункових моделях [14,20,21].

Загалом існуюча база досліджень залізобетонних плит на вибухові дії є досить широкою. Частина робіт присвячена розробленню та верифікації чисельних моделей із застосуванням ANSYS, ABAQUS, LIRA-FEM та інших програмних комплексів, зокрема для врахування фізичної і геометричної нелінійності, пошкодження бетону та високошвидкісного характеру навантаження. Експериментальні дослідження охоплюють як маломасштабні, так і повномасштабні випробування плит при контактних, близьких та повітряних вибухах. Українські дослідження багато у чому доповнюють експериментально-чисельну базу роботами з оцінювання фактичного технічного стану залізобетонних конструкцій після вибухового впливу.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: визначити товщин залізобетонних плит, що при стандартних рівнях армування будуть забезпечувати відсутність пробиття від вибуху зарядів у 50, 75 та 100 кг тротилу на відстанях 0.5, 1, 1.5 та 2 метри.

В подальшому отримані результати будуть використані для вибору товщини плити у рамках дослідження комбінованих перекриттів по сталевим балкам з перфорованими стінками на дію ударно-вибухового впливу.

Виклад основного матеріалу

Дослідження велося, використовуючи програмний комплекс Ansys. Характеристики матеріалів були задані у модулі Engineering Data, геометрія – у модулі DesignModeler, розрахунок вівся у модулі Mechanical з використанням процесору Explicit Dynamics.

Розрахункова швидкість детонації тротилу була прийнята на рівні 6930 м/с. При таких швидкостях вибухова хвиля досягає поверхні плити за долі мілісекунд. Більший проміжок часу займає реакція конструкції на таку надзвичайно інтенсивну і короточасну дію. За результатами моделювання для оцінки появи та характеру пробиття для відстаней до точки детонації у 0,5-2м достатніми були проміжки часу від 0.02 до 0.05с.

У рамках дослідження приймалася плита розмірами 6х6м. Розглядалася можливість зменшити розміри плити, зокрема, для пришвидшення розрахунків. Однак уже перші моделі показали, що за рахунок розсіювання хвилі зона пробиття найменшого заряду 50 кг на відстані 0.5 від поверхні плити склала 1950х1950мм. Для більших зарядів і відстаней ця зона збільшилася, що виключило можливість зменшення плити.

Заряди для серій розрахунків був прийнятий у формі куба з метою спрощення сітки і пришвидшення розрахунків. Для моделей, на яких детально досліджувався характер руйнування, були прийняті заряди сферичної

форми. Це стало результатом попередньої публікації на тему «Порівняння надлишкового тиску на перекриття при вибуху на малих відстанях від його поверхні» [7], де робився висновок що форма заряду впливає на розподіл тиску і сферичний заряд робить його більш ідеалізованим.

На перших етапах за базове було прийнято лише нижнє армування стержнями d10 з кроком 200мм. Проте перша серія моделей дала зрозуміти 2 речі:

1. Бетон, що кришиться від вибуху зверху, просто випадає через комірки сітки знизу (Рис. 1);
2. При лише нижньому армуванні знадобиться значно більша товщина плити.

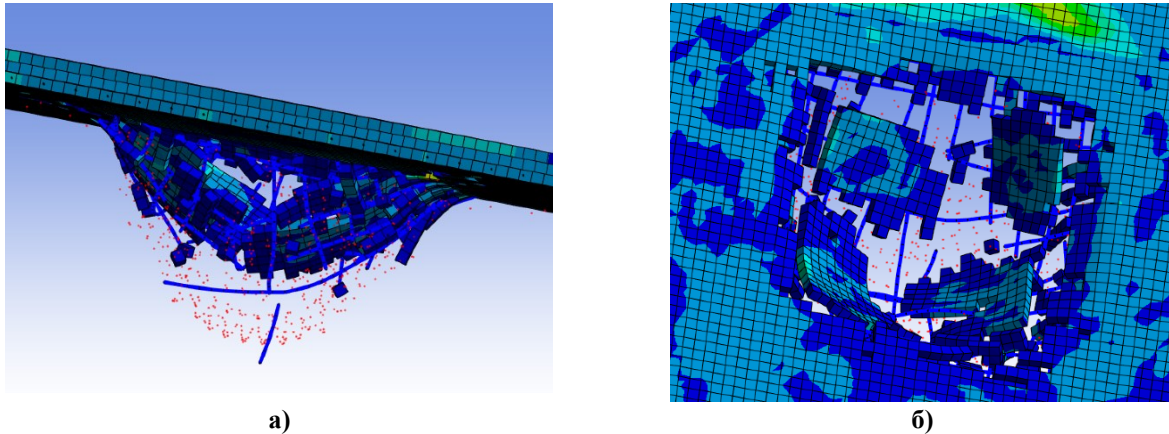


Рис. 1. Характер руйнування залізобетонної плити товщиною 200мм армованої тільки нижнім армування d10 з кроком 200мм в обох напрямках (постановка Ейлерівська (Віртуальне) / Eulerian (Virtual)): а) – вид збоку; б) – вид зверху

Так при вибуху 50 кг тротилу на відстані 0.5м від поверхні плити пробиття було відсутнє лише на плитах товщиною за 400мм.

Перший висновок дав зробити наступні важливі рекомендації для вибухостійких перекриттів:

1. Плити мають армуватися у 2 і більше шари (мінімум верхнє і нижнє армування);
2. Надається перевага меншому кроку стержнів;
3. Бажано зміщувати крок верхньої сітки відносно нижньої. Наприклад при кроці верхньої і нижньої сіток у 150мм робити зміщення верхньої відносно нижньої на 75мм в обох напрямках.

Для наступних серій моделей було прийняте верхнє і нижнє армування d10 з кроком 150мм в обох напрямках. Зміщення стержнів верхньої сітки відносно нижньої не задавалося. Хоча це і рекомендується, зміщення важко реалізувати і контролювати на практиці.

Прийняті матеріали:

- Бетон С35/45 за EN 1992-1-1:2004 (ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010);
- Арматура B500B за EN 1992-1-1:2004 (ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010).

Умови спирання:

- Вертикальне спирання по всій площині граней по периметру;
- Горизонтальні опори у двох напрямках по низу граней по периметру

Модель розглядалася у двох постановках. В одній вибухівка задавалася об'ємним тілом типу Ейлерівське (Віртуальне) / Eulerian (Virtual), у другій – Лагранжівське / Lagrangian.

Ейлерівське (Віртуальне) / Eulerian (Virtual) — це спеціальний тип об'ємного тіла, який не являє собою звичайне твердотіле тіло конструкції. Його основне призначення - формування Ейлерівської області для моделювання великих деформацій, переміщення матеріалу, вибуху та поширення ударної/вибухової хвилі. При такому підході розрахункова сітка залишається практично нерухомою, а матеріал переміщується крізь її комірки.

Лагранжівський / Lagrangian - тип об'ємного тіла, де вузли сітки переміщуються разом із матеріалом. При великих деформаціях це може призводити до значного викривлення або руйнування елементів.

Модель у Ейлерівській (Віртуальній) постановці вибухівки більш точно відобразила характер руйнування і розповсюдження вибухової хвилі. В такому випадку програма на певному етапі перетворює вибухівку на ідеалізований газ, розповсюдження якого обмежено заданою областю. Це набагато ближче відповідає фактичному вибуху. Проблемою стала різке зниження швидкості розрахунку.

Вибухівка в Лагранжівській постановці фактично представляє собою тверде тіло, що швидко розширюється. Показала себе як менш точна, однак швидка з точки зору розрахунку модель вибухівки.

На Рис. 1 і Рис. 2 приведено результати двох аналогічних моделей в різних постановках. На Рис. 1 – в постановці Ейлерівська (Віртуальне) / Eulerian (Virtual), на Рис. 2 - в постановці Лагранжівська / Lagrangian. В обох випадках плити товщиною 200мм армовані нижньою сіткою з арматури d10 кроком 200мм в обох напрямках з відстанню до точки детонації 0.5м від верхньої поверхні плити.

За результатами цих порівнянь попередньо було прийнято рішення для серій розрахунків обрати Лагранжівську постановку, а для дослідження характеру руйнування і пробиття – Ейлерівську.

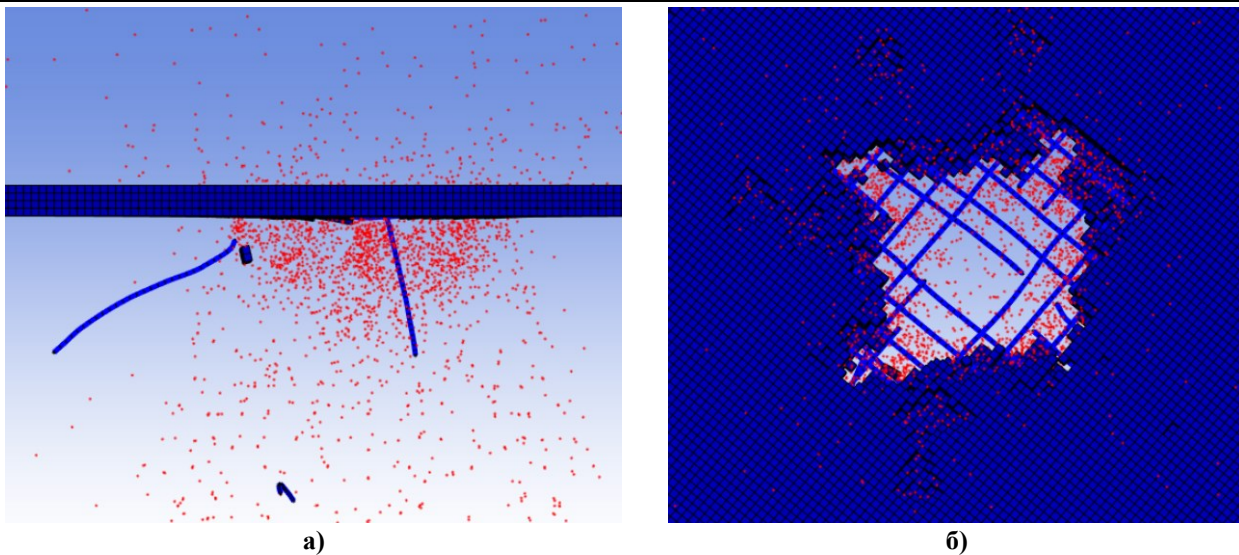


Рис. 2. Характер руйнування залізобетонної плити товщиною 200мм армованої тільки нижнім армуванням $\phi 10$ з кроком 200мм в обох напрямках (постановка Лагранжівська / Lagrangian): а) – вид збоку; б) – вид зверху

Однак подальші моделі у Лагранжівській постановці показали нереалістичні результати із пробиттям зарядом 50кг на відстані 0.5м навіть плити товщиною 1000мм (Рис. 3а). У Ейлерівській постановці при аналогічних параметрах вибуху пробиття не наступало уже за товщини 350мм (Рис. 3б). Як результат Лагранжівська постановка задач була відкинута. У Ейлерівській постановці спостереження показали значне зниження швидкості розрахунку саме у випадках пробиття. Для таких випадків розрахунковий проміжок часу було обмежено в межах від 0,02 до 0,05с, що давало можливість візуально підтвердити наявність пробиття без занадто значного часу розрахунку.

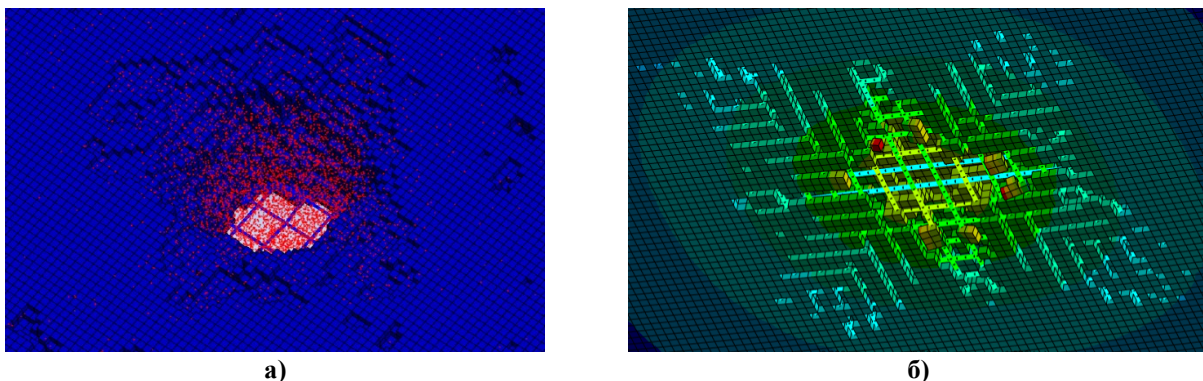


Рис. 3. Результат розрахунку плити: а) – товщиною 1000мм у Лагранжівській постановці (наскрізне пробиття, вид зверху); б) – товщиною 350мм у Ейлерівській постановці (розтріскування нижньої поверхні, відсутнє пробиття)

За основний критерій відмови матеріалів були прийняті граничні відносні деформації:

0,0035 (3.5 %) – для бетону;

0,05 (5%) – для арматурної сталі.

Щоб виключити сильно деформовані елементи було додано два додаткових критерії для їх виключення:

- обмеження кроку елемента в часі не менше 0,0000005 с;

- обмеження геометричної деформації не більше 1,5 (додатковий параметр виключення, коли програма не встигає виключати елементи по іншим критеріям).

Стан конструкції після вибуху було розділено на 4 категорії:

1. Наявність пробиття – виражений отвір у зоні найбільшого надлишкового тиску від вибуху;

2. Значне порушення цілісності – розтріскування і викришування значної частини низу плити та великі тріщини зверху плити, але без очевидно вираженого пробиття.

3. Порушення цілісності – розтріскування і викришування значної частини низу плити та точкові отвори зверху плити, через які надлишковий тиск розповсюджується у простір під нею;

4. Відсутність пробиття – розтріскування у нижній зоні плити без значного викришування чи утворення будь-яких отворів у її верхній поверхні.

Приклад кожної категорії за станом конструкції після вибуху наведено на Рис. 4 (а, б, в, г).

Категорія 2 «значне порушення цілісності» було додано до переліку останнім, оскільки спостереження показали, що на відстанях у 1, 1.5 та 2 м тиск поширюється на значно більшу площу. Через відсутність більш чіткої зони концентрації тиску перекриття прогинається і починає працювати у більшому ступені на розтяг як

Результати основних серій моделей зведені до Таблиці 1. У випадку наявності пробиття (позначено у таблиці червоним) числа вказують розмір зони пробиття. Як бачимо, зона пробиття змінюється в залежності від кількості вибухової речовини, товщини плити і відстані до точки детонації.

Розподіл результатів серій моделей в залежності від стану конструкції після вибуху

Заряд, кг	Відстань, м	Товщина плити, мм							
		150	200	250	300	350	400	450	500
50	0.5	2900x2900	1800x1800						
	1.0								
	1.5								
	2.0								
75	0.5	3000x3000	2250x2250	2100x2100					
	1.0								
	1.5								
	2.0								
100	0.5	3150x3150	3150x3150	2700x2700					
	1.0								
	1.5								
	2.0								

- Наявність пробиття

- Значне порушення цілісності

- Порушення цілісності

- Відсутність пробиття

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Важливим практичним висновком даної публікації є рекомендації, що можна дати щодо захисту від БПЛА з бойовими частинами на рівні від 50 до 100 кг у тротиловому еквіваленті. Якщо віддалити точку детонації на 1.5-2м від поверхні плити, то основна захисна конструкція може залишатися у межах стандартних товщин залізобетону у 200-250мм. Подібне влучання не призведе до руйнування плити, хоча їй знадобиться локальний ремонт. Треба буде вичистити і відновити розтріскану нижню частину плити. Відновлення можна зробити методами торкретування бетону.

Віддалити точку детонації можна за допомогою антидронових сіток або екранів. В обох випадках вони мають виготовлятися з негорючих бажано пластичних матеріалів і характеризуватися високою ремонтпридатністю. Пластичні матеріали будуть краще уловлювати фрагменти і розсіювати енергію вибухової хвилі. Це можуть бути легкі сталеві каркаси облицьовані панелями, розрахованими на удар БПЛА, що дозволить ініціювати вибух на необхідному віддаленні від основної конструкції. Для швидкої заміни панелі і елементи каркасу мають бути типовими швидкокомтованими елементами.

Щодо мінімальних товщин плит, то за результатами даного дослідження рекомендується приймати товщини залізобетонних плит не менше вказаних у Таблиці 2. Це дозволить виключити пошкодження, що важко піддаються ремонту.

У подальших дослідженнях слід дослідити комбіновану ударно-вибухову дію БПЛА на конструкцію. Оскільки дана робота ведеться в рамках дисертаційного дослідження на тему «Комбіноване перекриття по балкам з перфорованими стінками під дією епізодичного навантаження», то планується поетапний перехід від простих моделей окремих складових, до складніших моделей відповідних конструкцій з врахуванням результатів дослідження окремих частин. Наприклад, за результатами даного дослідження в подальшому будуть прийматися товщини і базове армування плит комбінованих перекриттів.

Таблиця 2

Мінімально рекомендовані товщини плит за результатами серій моделей

Заряд, кг	Відстань, м	Мінімально рекомендована товщина плити, мм
50	0.5	250
	1.0	200
	1.5	150
	2.0	150
75	0.5	300
	1.0	200
	1.5	200
	2.0	150
100	0.5	350
	1.0	250
	1.5	200
	2.0	150

Література

1. Anas S. M., Alam M., Umair M. Experimental and numerical investigations on performance of reinforced concrete slabs under explosive-induced air-blast loading: A state-of-the-art review. *Structures*. 2021. Vol. 31. P. 428–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.102>
2. Hao H., Zhang X. H., Li J. Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 195. 108066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108066>
3. Kumar V., Kartik K. V., Iqbal M. A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. 110125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>
4. Castedo R. et al. Air blast resistance of full-scale slabs with different compositions: Numerical modeling and field validation. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 86. P. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.08.004>
5. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 144. 103630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103630>
6. Біляєв М. А. Збірні сталезалізобетонні перекриття по сталевим балкам з круглими перфораціями стінок. *Науковий вісник будівництва*. 2026. Т. 1, № 114. С. 186–194. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2026.114.1.20>

7. Biliaiev M. Comparison of overpressure on floor slabs under blast loading at small distances from their surface. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2026. Iss. 18. P. 184–201. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.18.2026.184-201>
8. Wang W. et al. Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 49. P. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.010>
9. Yao S., Zhang D., Chen X., Lu F., Wang W. Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. P. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.027>
10. Li J., Wu C., Hao H. 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>
11. Zhou X. Q., Kuznetsov V. A., Hao H., Waschl J. Numerical prediction of concrete slab response to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35, No. 10. P. 1186–1200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.004>
12. Barabash M., Bashynskiy O. Some approaches to modeling blast wave impact on structures in LIRA-FEM. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2024. Iss. 113. P. 241–249. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.241-249>
13. Пурденко Р. Р., Рашкевич Н. В. Моделювання динамічної поведінки залізобетонних плит перекриття під імпульсним вибуховим навантаженням. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2026. № 21. DOI: <https://doi.org/10.52363/2518-1777-2026-21-2>
14. Mykhailovskiy D., Kotsiuruba V., Skliarov I., Komar O. Structural design under blast loading: from simplified models to advanced dynamic analysis. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2026. Iss. 116. P. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.243-250>
15. Li J., Hao H. Numerical study of concrete spall damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 68. P. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.02.001>
16. Глуховський В. А., Миколаєць М. О., Грипась В. І., Мелашенко Ю. Б. Оцінка міцності бетону монолітних плит перекриттів будівель, що зазнали вибухової дії. *Наука та будівництво*. 2025. Т. 45, № 3. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2025-3>
17. Shekhovtsov V., Fesenko O., Malakhov V., Dmytrenko Y. Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 135–144. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>
18. Гетун Г. В., Колякова В. В., Безклубенко І. О., Соломін А. С. Конструктивні рішення вибухостійких будівель з приміщеннями цивільного захисту населення. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. Київ, 2023. Вип. 13. С. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.41-50>
19. Barabash M., Maksymenko V., Kostyra N., Barmin I. Assessment of the resistance of the hangar protective structure to explosive impacts. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 212–221. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.212-221>
20. Mykhailovskiy D., Skliarov I., Komar O. Comparison of methods for calculating blast wave parameters for the design of protective structures. *Construction Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 110–122. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.110-122>
21. Mykhailovskiy D., Skliarov I., Komar O. Analysis of calculation methods for explosion shock wave parameters in the design of protective structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2025. Iss. 114. P. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.173-182>

References

1. Anas S. M., Alam M., Umair M. Experimental and numerical investigations on performance of reinforced concrete slabs under explosive-induced air-blast loading: A state-of-the-art review. *Structures*. 2021. Vol. 31. P. 428–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.102>
2. Hao H., Zhang X. H., Li J. Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering*. 2020. Vol. 195. 108066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108066>
3. Kumar V., Kartik K. V., Iqbal M. A. Experimental and numerical investigation of reinforced concrete slabs under blast loading. *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. 110125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110125>
4. Castedo R. et al. Air blast resistance of full-scale slabs with different compositions: Numerical modeling and field validation. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 86. P. 145–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.08.004>
5. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. Vol. 144. 103630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103630>
6. Biliaiev M. A. Zbirni stalezalizobetonni perekryttia po stalevym balkam z kruhlymy perforatsiaymy stinok. *Naukovyi visnyk budivnytstva*. 2026. Vol. 1, No. 114. P. 186–194. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2026.114.1.20>
7. Biliaiev M. Comparison of overpressure on floor slabs under blast loading at small distances from their surface. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2026. Iss. 18. P. 184–201. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.18.2026.184-201>
8. Wang W. et al. Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 49. P. 158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.03.010>
9. Yao S., Zhang D., Chen X., Lu F., Wang W. Experimental and numerical study on the dynamic response of RC slabs under blast loading. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. P. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.027>
10. Li J., Wu C., Hao H. 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>

11. Zhou X. Q., Kuznetsov V. A., Hao H., Waschl J. Numerical prediction of concrete slab response to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35, No. 10. P. 1186–1200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.01.004>
12. Barabash M., Bashynskiy O. Some approaches to modeling blast wave impact on structures in LIRA-FEM. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2024. Iss. 113. P. 241–249. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.241-249>
13. Purdenko R. R., Rashkevych N. V. Modeliuvannya dynamichnoi povedinky zalizobetonnykh plyt perekryttia pid impulsnym vybukhovym navantazhenniam. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2026. № 21. DOI: <https://doi.org/10.52363/2518-1777-2026-21-2>
14. Mykhailovskiy D., Kotsiuruba V., Skliarov I., Komar O. Structural design under blast loading: from simplified models to advanced dynamic analysis. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2026. Iss. 116. P. 243–250. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2026.116.243-250>
15. Li J., Hao H. Numerical study of concrete spall damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 68. P. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.02.001>
16. Hlukhovskiy V. A., Mykolaiets M. O., Hrypas V. I., Melashenko Yu. B. Otsinka mitsnosti betonu monolitnykh plyt perekryttiv budivel, shcho zaznaly vybukhovoii dii. *Nauka ta budivnytstvo*. 2025. Vol. 45, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-3-2025-3>
17. Shekhovtsov V., Fesenko O., Malakhov V., Dmytrenko Y. Assessment and repairment of the reinforced concrete structures damaged due to Russian missile attack. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 135–144. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.135-144>
18. Hetun H. V., Koliakova V. V., Bezklubenko I. O., Solomin A. S. Konstruktyvni rishennia vybukhostiikykh budivel z prymishchenniamy tsyvilnoho zakhystu naselennia. *Budivelni konstruktzii. Teoriia i praktyka*. Kyiv, 2023. Iss. 13. P. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.41-50>
19. Barabash M., Maksymenko V., Kostyra N., Barmin I. Assessment of the resistance of the hangar protective structure to explosive impacts. *Building Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 212–221. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.212-221>
20. Mykhailovskiy D., Skliarov I., Komar O. Comparison of methods for calculating blast wave parameters for the design of protective structures. *Construction Structures. Theory and Practice*. Kyiv, 2025. Iss. 16. P. 110–122. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.16.2025.110-122>
21. Mykhailovskiy D., Skliarov I., Komar O. Analysis of calculation methods for explosion shock wave parameters in the design of protective structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Kyiv, 2025. Iss. 114. P. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.173-182>