МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівельних конструкцій

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри
Будівельних конструкцій
_____ /……/
підпис
«___»_____202__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

На тему: «Проектування захисного укриття цивільного призначення»

Виконав Жигилій Д.О.
_____ _____
(підпис) (Прізвище, ініціали)

Група ЗПЦБ 2401 м
_____

Науковий керівник Циганенко Л.А.
_____ _____
(підпис) (Прізвище, ініціали)

Суми – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Жигилій Дмитро Олексійович. Проектування захисного укриття цивільного призначення – Кваліфікаційна робота магістра на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Робота складається із *змісту*, *загальної характеристики роботи та її кваліфікаційних ознак, огляд досліджень за обраною темою, розділів основної частини*, *висновків за результатами магістерської кваліфікаційної роботи* (українською та англійською мовами).

Сформульовано **мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження, методи наукового дослідження.**

Результати досліджень: розроблена та верифікована симуляційна скінченно-елементна модель (цифровий двійник) обраного укриття, створена в програмному комплексі FreeCAD. За допомогою цієї моделі виконано числове дослідження напружено-деформованого стану конструкції під дією розрахункових впливів вибуху. Результати представлені у вигляді розподілів характеристик напружено-деформівного стану. Виявлено критичні зони концентрації напружень і узгоджено з виявлним армування та товщину конструктивних елементів. Таким чином, робота пропонує не просто аналіз проблеми, а конкретний інженерний інструментарій для проектування більш надійних та ефективних протиуламкових укриттів.

Аналіз публікацій та досліджень розкриває глибоку кризу цивільного захисту, спричинену повномасштабною війною в Україні. Систематичні удари сучасними засобами ураження, як-от крилаті ракети та БпЛА, продемонстрували конструктивну вразливість міської забудови та неадекватність застарілих протоколів безпеки. У пошуках ефективних рішень дослідження звертається до міжнародних прецедентів, зокрема до комплексної системи пасивної оборони Ізраїлю з її інтегрованими

захищеними приміщеннями та модульними укриттями. Однак пряме копіювання цих рішень вимагає адаптації до специфічних загроз та умов України.

Водночас, аналогія з сейсмостійким будівництвом виявляє фундаментальну проблему: комплексне підсилення всього існуючого фонду будівель є економічно та логістично нереалістичним. Це зумовлює зміну парадигми від глобального захисту до концепції локального виживання. Перспективним напрямом стає створення високоміцних захисних ядер або модулів безпеки безпосередньо всередині будівель. Такі елементи проектуються здатними витримати навіть прогресуюче обвалення основної конструкції, забезпечуючи збереження життя людей, що перебувають усередині.

Цей підхід є особливо актуальним, оскільки існуючі комерційні рішення, як-от посилені меблі чи зовнішні бункери, визнані неадекватними для умов щільної міської забудови через недостатню міцність або логістичну недоступність. На цьому тлі вітчизняна практика демонструє активне реагування на нові виклики. Прийняття оновлених ДБН В.2.2-5:2023 та масове впровадження швидкоспоруджуваних протиуламкових укриттів (SafePlace, ARCA-NOVA) є практичним втіленням цієї нової філософії захисту. Це підкреслює гостру потребу в науково-обґрунтованому структурному аналізі для проектування та оптимізації таких споруд, що і є центральним завданням даної роботи.

В основній частині роботи було проведено інженерне проектування захисної споруди у два етапи. Спочатку, на основі емпіричних формул, було визначено початкову товщину конструкції, необхідну для захисту від уламків. Паралельно було розраховано навантаження від вибухової хвилі, що стало другим ключовим фактором впливу. Для перевірки цього початкового проекту було створено комп'ютерну скінчено-елементну модель. Моделювання виявило критичний недолік: розрахована лише на уламки товщина виявилася недостатньою для того, щоб витримати тиск від вибуху, і конструкція зазнавала руйнування. На основі цих даних було прийнято головне конструктивне рішення – суттєво збільшити товщину всіх огороджувальних елементів. Повторний аналіз підтвердив, що посилена конструкція успішно витримує

розрахункове навантаження. Таким чином, було доведено, що саме вплив вибухової хвилі, а не уламків, є визначальним фактором при проектуванні надійного укриття.

У **висновках** підведено підсумок розв’язання проблеми проектування надійних захисних споруд в умовах сучасної війни, яка виявила недієвість застарілих інженерних підходів. Доведено, що проектування укриття виключно для захисту від уламків є критичною помилкою. Комп'ютерне моделювання показало, що конструкція, достатня для зупинки шрапнелі, зазнає руйнувань під дією тиску від вибухової хвилі. Головним практичним результатом стало наукове обґрунтування необхідності суттєво збільшити товщину всіх огороджувальних конструкцій. Показано, що посилена споруда здатна витримати комплексний вплив вибуху. Також було запропоновано ефективні архітектурні рішення, як-от вхід-лабіринт та оптимізована форма споруди. Робота демонструє, як за допомогою доступних інструментів можна виявити фундаментальні недоліки проекту та розробити значно надійніше інженерне рішення.

Ключові слова: протиуламкова захисна споруда, структурний аналіз, метод скінченних елементів, вибухове навантаження, залізобетон, ударна хвиля, напружено-деформований стан.

Список публікацій та/або виступів на конференціях студента:

Циганенко Л. А., Жигилій Д. О. Оцінка граничної балістичної швидкості для бетонних відкритих протиуламкових укриттів за емпіричними моделями.// The 10th International scientific and practical conference “Global trends in science and education” (October 20-22, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua".– Kyiv, Ukraine. 2025. 774 p. (P. 243 – 247)

В **додатках** наведено: тези конференції, альбом слайдів мультимедійної презентації.

Структура роботи.

Робота складається з основного тексту на 73 сторінках, у тому числі 5 таблиць, 23 рисунка. Текст роботи містить загальну характеристику роботи, 4 розділів, висновки і рекомендації за результатами роботи, список з 53 використаних джерел, 1 додаток на 22 сторінках. Графічна частина складається 32 слайдів мультимедійної презентації.

ANNOTATION

Zhyhylii, Dmytro Oleksiiovych. Design of a protective shelter for civilian purposes – Master's Thesis (submitted as a manuscript).

Master's Thesis in specialty 192 "Construction and Civil Engineering". – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The thesis consists of *a table of contents, a general characterization of the work and its qualification attributes, a review of research on the chosen topic, chapters of the main part, and conclusions from the Master's Thesis (in Ukrainian and English)*.

The goal, objectives, object, and subject of the research, as well as **the scientific research methods**, are formulated.

Research results. A simulation finite element model (a digital twin) of the selected shelter was developed and verified in the FreeCAD software package. Using this model, a numerical study of the stress-strain state of the structure under design blast effects was performed. The results are presented as distributions of stress-strain state characteristics. Critical zones of stress concentration were identified and correlated with the specified reinforcement and thickness of the structural elements. Thus, the work offers not just an analysis of the problem, but a specific engineering toolkit for designing more reliable and effective anti-fragmentation shelters.

Analysis of Publications and Research. The analysis of scientific publications reveals a deep crisis in civil protection caused by the full-scale war in Ukraine. Systematic strikes with modern weapons, such as cruise missiles and UAVs, have demonstrated the structural vulnerability of the urban environment and the inadequacy of outdated safety protocols. In the search for effective solutions, the research turns to international precedents, particularly Israel's comprehensive passive defense system with its integrated protected spaces and modular shelters. However, the direct replication of these solutions requires adaptation to the specific threats and conditions of Ukraine.

At the same time, an analogy with seismic-resistant construction reveals a fundamental problem: the comprehensive strengthening of the entire existing building stock is economically and logistically unrealistic. This necessitates a paradigm shift from global protection to the concept of local survival. A promising direction is the creation of high-strength protective cores or safety modules directly inside buildings. Such elements are designed to withstand even the progressive collapse of the main structure, ensuring the survival of the people inside.

This approach is particularly relevant as existing commercial solutions, such as reinforced furniture or external bunkers, are deemed inadequate for dense urban environments due to insufficient strength or logistical inaccessibility. Against this backdrop, domestic practice demonstrates an active response to new challenges. The adoption of the updated SBN V.2.2-5:2023 and the mass implementation of rapidly deployable anti-fragmentation shelters (SafePlace, ARCA-NOVA) are practical embodiments of this new protection philosophy. This underscores the urgent need for a scientifically-grounded structural analysis for the design and optimization of such structures, which is the central task of this work.

In the main part. The engineering design of the protective shelter was carried out in two stages. First, based on empirical formulas, the initial thickness of the structure required for protection against fragments was determined. In parallel, the load from a blast wave was calculated, which became the second key influencing factor. To verify this initial design, a computer-based finite element model was created. The simulation revealed a critical flaw: the thickness calculated only for fragments was insufficient to withstand the pressure from the blast, and the structure would fail. Based on this data, the main design decision was made to significantly increase the thickness of all enclosing elements. A re-analysis confirmed that the reinforced structure successfully withstands the design load. Thus, it was proven that the impact of the blast wave, not the fragments, is the decisive factor in designing a reliable shelter.

In the conclusions, the solution to the problem of designing reliable protective structures in the context of modern warfare, which has revealed the ineffectiveness of outdated engineering approaches, is summarized. It is proven that designing a shelter

exclusively for protection against fragments is a critical mistake. Computer modeling showed that a structure sufficient to stop shrapnel would be destroyed by the pressure from a blast wave. The main practical result is the scientific justification for the need to significantly increase the thickness of all enclosing structures. It is shown that the reinforced structure can withstand the complex impact of a blast. Effective architectural solutions, such as a labyrinth entrance and an optimized shape of the structure, were also proposed. The work demonstrates how, using accessible tools, one can identify fundamental design flaws and develop a much more reliable engineering solution.

Keywords: anti-fragmentation protective shelter, structural analysis, finite element method, blast load, reinforced concrete, blast wave, stress-strain state.

List of student's publications and/or conference presentations:

Tsyhanenko, L. A., Zhyhylii, D. O. Assessment of the Ballistic Limit Velocity for Concrete Open Anti-Fragmentation Shelters Using Empirical Models. // The 10th International scientific and practical conference “Global trends in science and education” (October 20-22, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua".– Kyiv, Ukraine. 2025. 774 p. (P. 243 – 247).

The appendices include: the conference abstract, an album of multimedia presentation slides.

Thesis Structure.

The thesis consists of the main text on 73 pages, including 5 tables and 23 figures. The text of the work contains a general characterization of the work, 4 chapters, conclusions and recommendations based on the results of the work, a list of 53 cited sources, and 2 appendices on 22 pages. The graphical part consists of 32 slides of a multimedia presentation.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ……...10
РОЗДІЛ 2 КРИЗА СТРУКТУРНОЇ ТА МІСЬКОЇ СТІЙКОСТІ: ПЕРЕОЦІНКА ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ КІНЕТИЧНОЇ ВІЙНИ……..……...12
2.1 Колапс протоколів безпеки та забудованого середовища…….……12
2.2 Міжнародні прецеденти в проектуванні захисту: ізраїльська модель……..…..……13
2.3 Цивільні укриття як системи пасивної оборони……..……..15
2.4 Інтеграція з системами активної оборони……...16
2.5 Оцінка сейсмічної вразливості глобального фонду будівель……17
2.6 Проект SHELTER як зміна парадигми в бік локального захисту життя……19
2.7 Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень……22
2.8 Вітчизняні підходи до проектування протиуламкових захисних споруд……..……26
2.9 Висновки за другим розділом……..33
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ БАР'ЄРУ ПРОТИ БАЛІСТИЧНОГО УДАРУ…….…35
3.1 Товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом…….…..35
3.2 Аналіз вибухового навантаження……41
3.3 Висновки за третім розділом……53
4 РОЗРАХУНКОВА СКІНЧЕНО ЕЛЕМЕНТНА СИМУЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ УКРИТТЯ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ У FREECAD……55
4.1 Моделювання геометрії та матеріалів: бетон та арматура…….55
4.2 Скінчено елементна модель та граничні умови до неї……..…58
4.3 Чисельне розв'язання квазістатичної задачі міцності……60
4.4 Висновки за четвертим розділом……..65
ВИСНОВКИ…….66
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ……..68
ДОДАТОК А Тези доповіді на конференції……..74
ДОДАТОК Б Мультимедійна презентація……..83

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми: В умовах повномасштабної військової агресії проти України, що супроводжується постійними ракетними ударами, артилерійськими обстрілами та атаками безпілотних літальних апаратів, забезпечення безпеки цивільного населення стало першочерговим завданням. Наявність надійних захисних споруд цивільного захисту перетворилася з теоретичної вимоги на життєво важливу необхідність.

Водночас, зростаючий попит на укриття породжує ризик появи імпровізованих конструкцій, зведених без належного інженерного аналізу, або навпаки застосування наскоро прийнятих неперевірених практикою будівельних норм. Такі споруди, хоч і можуть створювати хибне відчуття безпеки, насправді не здатні протистояти специфічним загрозам, як то дія уламків з високою кінетичною енергією та ударної хвилі від вибуху. Неправильно спроектоване укриття може не лише не виконати свою захисну функцію, але й стати пасткою.

Мета дослідження. Виходячи з актуальності й ступеня наукової розробки проблеми, метою дослідження є застосування науково-обґрунтованого інженерного підходу до проектування протиуламкових укриттів, на основі симуляції композитної споруди з армованого бетону під дією уражуючих факторів вибухів різного генезу в умовах російсько-української війни 2022 року.

Для досягнення поставленої мети були встановлені наступні **завдання дослідження.**

– Проаналізувати характерні засоби ураження та типи пошкоджень цивільних об’єктів в Україні з 2022 року.

– Вивчити існуючу нормативну базу та сучасні підходи до проектування захисних споруд. Дослідити нормативну базу і визначити кращі підходи до проектування протиуламкових укриттів, на основі симуляції композитної споруди з армованого бетону під дією уражуючих факторів вибухів.

– Обґрунтувати і побудувати симуляційну скінчено елементу модель нової конструкції протиуламкового укриття, на основі симуляції роботи такої композитної споруди з використанням програмного комплекса FreeCAD.

– Виконати числове дослідження напружено-деформованого стану несучих елементів споруди під вибухового навантаження.

– Запропонувати конструктивні рішення, спрямовані на підвищення захисних властивостей споруди.

Об’єкт дослідження: процес навантаження та роботи конструкцій протиуламкової захисної споруди під дією вибухів.

Предмет дослідження: напружено-деформований стан та параметри міцності елементів захисної конструкції при динамічному навантаженні.

Методи наукового дослідження: метод скінчених елементів,

Наукова новизна. Полягає в адаптації методів структурного аналізу для проектування протиуламкових споруд до специфічних умов та загроз, що виникли під час повномасштабної війни в Україні, з урахуванням характеристик сучасних засобів ураження.

Практичне значення. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні нових та модернізації існуючих захисних споруд цивільного захисту, зокрема, укриттів швидкого розгортання, для підвищення рівня безпеки населення в умовах воєнних дій.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дослідження, що відносятся на захист, одержані автором самостійно або за його активної участі.

Апробація роботи. Основні положення наукової роботи відображено в тезах Global trends in science and education. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2025.

РОЗДІЛ 2 КРИЗА СТРУКТУРНОЇ ТА МІСЬКОЇ СТІЙКОСТІ: ПЕРЕОЦІНКА ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ КІНЕТИЧНОЇ ВІЙНИ

2.1 Колапс протоколів безпеки та забудованого середовища

Катастрофічна деградація давно встановленої міжнародної нормативно-правової бази, спрямованої на збереження глобальної стабільності та гуманітарних норм, призвела до повної системної відмови. Цей колапс був спровокований початком повномасштабних бойових дій російською Федерацією проти територіальної цілісності та суверенної інфраструктури України [1]. Виникнення конфлікту високої інтенсивності на європейському театрі воєнних дій, що досяг масштабів, небачених із середини XX століття, слугує передвісником потенційної глобальної нестабільності. Як наслідок, авторитарні режими виявили критичну відсутність структурної жорсткості у глобальних інституційних реакціях та нехтування обов’язковим характером міжнародних договорів [2–4].

Початок агресії проти України здійснювався за допомогою багатовекторної стратегії гібридної війни, що використовувала політичні, економічні та інформаційні підсистеми поряд із безпосередньою військовою кінетикою [5, 6]. Ця гібридність швидко переросла у високоінтенсивну «спеціальну військову операцію» (СВО), що характеризується систематичним порушенням міжнародного гуманітарного права [7] та цілеспрямованим руйнуванням цивільної інфраструктури. Ця зміна парадигми вимагає термінової переоцінки протоколів безпеки для населення, що не бере участі у бойових діях і проживає в урбанізованому середовищі. Ці цивільні особи, включаючи вразливі демографічні групи, такі як діти та люди похилого віку, піддаються регулярним обстрілам крилатими та балістичними ракетами, а також баражуючими боєприпасами (дронами-камікадзе). Ці системи озброєння створюють екстремальні динамічні навантаження на забудоване середовище, випробовуючи на міцність житлові та муніципальні зони, які спочатку не проєктувалися для таких сценаріїв впливу.

Хоча світова спільнота володіє широкими методологіями для вирішення складних логістичних та інженерних проблем, нинішня траєкторія свідчить про нездатність адекватно зменшити ризики, спричинені державним тероризмом. Захист цивільного населення в межах міських кластерів високої щільності залишається критичним інженерно-планувальним завданням. Імперативом є розвиток інфраструктури, здатної пом’якшувати ефекти надлишкового тиску вибухової хвилі та уламкової дії (фрагментації), тим самим знижуючи рівень смертності та травматизму. Це вимагає переходу від реактивних заходів до превентивного структурного зміцнення (посилення) та негайної капіталізації національного фонду, присвяченого проектуванню та будівництву захисних споруд у всіх муніципальних юрисдикціях.

2.2 Міжнародні прецеденти в проектуванні захисту: ізраїльська модель

При розробці надійної стратегії цивільного захисту Україна може проаналізувати структурні інженерні рішення, впроваджені іншими країнами, що діють в умовах постійної загрози. Ізраїль, наприклад, створив комплексну мережу мобільних і стаціонарних фортифікаційних споруд [8]. Ці рішення особливо поширені в південних регіонах з мінімальним часом попередження, що вимагає захисту швидкого доступу, такого як посилені автобусні термінали та окремі бетонні модулі.

Ізраїльську інфраструктуру цивільної оборони можна класифікувати за кількома інженерними типологіями:

1. Захищені житлові ядра (Мамади) є залізобетонним блоками, інтегрованими в структурний план приватних резиденцій. У мирний час вони функціонують як стандартні житлові кімнати; однак структурно вони слугують діафрагмами жорсткості та вибухостійкими притулками, розрахованими на витримування специфічних імпульсних навантажень.

2. Розгортувані фортифікаційні системи, що складаються з модульних, розкладних балістичних бар’єрів, які можуть бути встановлені в існуючих житлових

приміщеннях. Це дозволяє швидко перетворити стандартну кімнату на укриття, стійке до уламків.

3. Зміцнення критичної інфраструктури передбачає структурну модернізацію (ретрофітинг) соціально значущих об’єктів, таких як транспортні вузли (автобусні зупинки) та навчальні заклади, підвищуючи їх стійкість до вибухових хвиль та шрапнелі.

4. Модульні дзвоноподібні фортифікації є тимчасовими збірними бетонними блоками, що розраховані на обмежену кількість людей. Їхня геометрична конфігурація – часто дзвоноподібна або куполоподібна – покращує структурне відхилення (розсіювання) енергії вибуху та дозволяє швидке розгортання на відкритій місцевості або вздовж транспортних артерій.

5. Використання підземних комунікацій через адаптацію залізобетонних каналізаційних та дренажних труб великого діаметра як імпровізованих лінійних сховищ. Ці споруди використовують ефект «ґрунтового склепіння», забезпечуючи природний захист завдяки шару ґрунту та притаманній міцності на стиск циліндричних бетонних форм.

Крім того, Ізраїль використовує доктрину «захищеного простору», яка використовує існуючі архітектурні особливості, що спочатку не проектувалися як сховища. Ця інженерна евристика визначає зони, відокремлені від зовнішнього середовища щонайменше двома структурними або перегородковими стінами та позбавлені віконних отворів. Це «правило двох стін» ґрунтується на фізиці поширення вибухової хвилі та дисипації кінетичної енергії. Зовнішня стіна поглинає первинний удар і детонацію, тоді як внутрішня стіна діє як бар’єр проти відколювання (фрагментації бетону) та вторинних уламків. Ця методологія значно знижує рівень втрат під час масованих атак [9] із застосуванням осколково-фугасних снарядів [10–12].

Незважаючи на наявність цих прецедентів, пряме перенесення цих технологій ускладнюється тим, що національні держави засекречують свої специфічні параметри оборонної інженерії та оцінки вразливості. Поточні підходи часто вирішують ізольовані, локальні інженерні завдання, а не застосовують цілісний системний

інженерний підхід. Отже, розробка методологічної бази для прийняття рішень щодо вибору, розміщення та модернізації цивільних укриттів проти балістичних загроз та загроз БПЛА залишається нагальним пріоритетом для секторів цивільного будівництва та містобудування [13].

2.3 Цивільні укриття як системи пасивної оборони

Світова оборонна промисловість дедалі більше зосереджується на високоточних боєприпасах, призначених для обмеження супутніх збитків шляхом «скальпування» конкретних пріоритетних цілей [14]. Однак оперативна доктрина Російської Федерації в нинішньому конфлікті ігнорує ці обмеження. У контексті сучасних неоголошених воєн забудоване середовище та його цивільні мешканці розглядаються як невід'ємні компоненти бойового простору. Поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як систем доставки кінетичних вантажів розширює радіус і частоту структурних пошкоджень.

Стаття [15] розглядає зростаючу матрицю загроз, що створюються баражуючими боєприпасами, і пропонує методології оцінки загроз, включаючи моделювання векторів атаки БПЛА з використанням методів аналізу дерева відмов. Аналогічно, дослідження [16] надає поглиблений аналіз використання БПЛА у кінетичних та кіберфізичних протистояннях. Автори пропонують контрзаходи, засновані на аеродинамічних і технічних обмеженнях цих літальних апаратів. Однак, з погляду цивільної інженерії, ці дослідження зосереджені насамперед на векторі загрози, а не на структурній реакції споруд або оцінці ефективності укриттів.

Цивільні укриття є критичним компонентом «пасивної оборони» – стратегічного підходу, що покладається на структурну стійкість, а не на активне перехоплення. Стаття [17] розглядає стратегічні наслідки пасивної оборони в міському плануванні, зокрема для країн, розташованих у геостратегічно вразливих місцях, що межують з експансіоністськими державами. Дослідження наголошує на інтеграції критеріїв захисного проєктування на етапі розробки генерального плану міста.

Комплексний аудит наявного фонду укриттів запропоновано в [18]. У 2022 році Державна пожежна служба Польщі провела масштабну інвентаризацію захисних споруд, випустивши геопросторовий додаток із деталізацією розташування та класифікації укриттів. Проте автори вказують на значні проблеми з достовірністю даних, зазначаючи, що база даних часто є неповною або неточною. Це підкреслює необхідність створення міждисциплінарної робочої групи у складі інженерів-будівельників, архітекторів та фахівців з управління надзвичайними ситуаціями. Цій групі було б доручено розробити суворі критерії оцінки структурної цілісності та придатності укриттів до спектра розрахункових навантажень, включаючи військову балістику, промислові аварії та екологічні катастрофи.

2.4 Інтеграція з системами активної оборони

Ізраїльська модель ілюструє синергію між пасивним структурним захистом та системами активної оборони, такими як «Залізний купол». Ефективність фізичних укриттів часто залежить від взаємодії людини з автоматизованими системами попередження. Дослідження [19] вивчає аспекти поведінкової інженерії цієї динаміки, аналізуючи, як довіра цивільного населення до системи протиракетної оборони впливає на рішення шукати притулок у визначених укриттях (ADS). Хоча дослідження спирається на метрики надійності, його основна увага зосереджена на інтерфейсі «людина-машина» та психологічному сприйнятті ймовірності безпеки.

Схожа проблема досліджується в [20], де аналізуються результати помилкового сприйняття ймовірності ураження балістичними ракетами. Це дослідження підкреслює небезпеку помилки оператора в автоматизованих системах протиповітряної оборони та підтримує аргументацію щодо розробки комплексних алгоритмів оцінки загроз, які мінімізують людську затримку та помилки.

Значний аналітичний звіт [21], підготовлений на замовлення ВПС США в Європі (USAFE), розглядає питання захисту інфраструктури авіабаз від крилатих ракет, балістичних ракет та БПЛА. Звіт включає аналіз укріплених укриттів та надає рекомендації щодо структурної модернізації та ретрофітингу. Однак ця робота має

переважно аналітичний характер і стосується військових об’єктів, не пропонуючи узагальненої методології для вибору та оптимізації цивільних захисних споруд у щільному міському середовищі.

Важлива роль систем підтримки прийняття рішень (СППР) в оборонних операціях підтверджується в [22]. Це дослідження деталізує експеримент із впровадженням СППР для підвищення тактичної ситуаційної обізнаності. Хоча це є актуальним, моделювання ґрунтується на даних розвідки БПЛА, що відрізняється від вимог цивільної інженерії щодо оцінки стаціонарних структурних активів.

2.5 Оцінка сейсмічної вразливості глобального фонду будівель

Найближчим аналогом впливів, пов’язаних з активною фазою бойових дій, є технічна переоцінка локальних систем життєзабезпечення для сейсмічно вразливих споруд. У численних географічних регіонах, що характеризуються високою сейсмічною небезпекою, значна частина існуючого фонду забудови має суттєві конструктивні недоліки. Ці споруди, особливо зведені до розробки та впровадження сучасних норм сейсмостійкого проектування, не мають необхідного поєднання несучої здатності до сприйняття горизонтальних навантажень та характеристик пластичності, що є необхідними для протистояння розрахунковим сейсмічним коливанням ґрунту, ймовірнісним для їхнього терміну експлуатації. Сейсмічна вразливість є особливо гострою в таких регіонах, як Південна Європа, Центральна Америка, західне узбережжя Південної Америки та частини Близького Сходу, включно з Іраном, Іраком та Туреччиною. Цей підвищений профіль ризику переважно зумовлений величезним обсягом застарілих та часто історично значущих будівель, конструкції яких виконані з неармованої кам’яної кладки (URM) або ранніх залізобетонних каркасних систем з недостатньою пластичністю [24].

Ці застарілі конструктивні системи за своєю природою схильні до крихких механізмів руйнування під дією циклічних сейсмічних навантажень. Їм часто бракує адекватних систем сприйняття горизонтальних навантажень, належної деталізації вузлів з’єднання між конструктивними елементами (наприклад, дисків перекриття зі

стінами) та здатності до непружних деформацій, що є фундаментальною для розсіювання (дисипації) енергії під час сейсмічного впливу. Як наслідок, під дією значних коливань ґрунту такі будівлі схильні до катастрофічних механізмів руйнування, зокрема руйнування стін з площини, механізмів «м'якого» або «слабкого» поверху та прогресуючого поповерхового обвалення («складання») всієї системи перекриттів. Неминучим результатом таких руйнувань конструкцій є висока частота часткових або повних обвалень будівель, що призводить до значних людських жертв і травм. Ця трагічна кореляція була емпірично підтверджена під час обстежень наслідків нещодавніх землетрусів, як-от серія землетрусів Mww 6.2 у центральній Італії поблизу Аматриче (2016 р., 298 жертв), землетрус Mww 7.1 у Пуеблі, що вразив Мехіко (2017 р., 370 жертв), та землетрус Mww 7.3 на ірано-іракському кордоні (2017 р., 440 жертв) [25].

З погляду інженерії будівельних конструкцій, теоретично оптимальною стратегією пом'якшення наслідків є комплексна програма сейсмічного підсилення всіх виявлених вразливих споруд. Таке втручання передбачало б детальні обстеження конструкцій для виявлення специфічних дефектів, з подальшим проектуванням та впровадженням заходів з підсилення для підвищення експлуатаційних характеристик будівлі до рівня, що відповідає цілям безпеки життя або запобігання обваленню, встановленим сучасними нормами проектування за критеріями роботоздатності, як-от EN 1998 (Єврокод 8) [26]. Ці заходи є технологічно зрілими і можуть включати широкий спектр методів: влаштування нових залізобетонних діафрагм жорсткості або сталевих зв'язкових каркасів, монтаж рамних систем, що сприймають згинальні моменти, застосування композитів на основі полімерних волокон (FRP) для обойму вання та підсилення на зсув колон та балок, або впровадження передових систем, як-от сейсмоізоляція фундаментів чи пристрої розсіювання енергії (наприклад, в'язкісні або фрикційні демпфери).

Однак реалізація такої глобальної стратегії підсилення в суспільному масштабі стикається з величезними економічними та логістичними перешкодами. Прямі витрати, пов'язані з інженерним проектуванням, матеріалами та спеціалізованою робочою силою, є значними. Більше того, непрямі витрати, включно з обов'язковою

евакуацією мешканців та переміщенням резидентів або бізнесу на тривалі періоди – часто на кілька місяців або років – роблять такі проекти фінансово та соціально неприйнятними для переважної більшості власників будівель та державних установ. Тому глобальна реалізація комплексного сейсмічного підсилення не є прагматичною чи очікуваною реальністю в найближчі десятиліття. У цьому контексті панівний підхід до підсилення всієї будівлі розглядався як єдиний життєздатний шлях для уникнення масових жертв під час потужного землетрусу, що спричиняє руйнування конструкцій. Ця парадигма зараз піддається перегляду завдяки досягненням у сенсорних та комунікаційних технологіях, які уможливлюють нові, цільові стратегії захисту життя.

2.6 Проект SHELTER як зміна парадигми в бік локального захисту життя

Ця інноваційна стратегія безпеки активно розробляється в рамках проєкту SHELTER (Structural Hyper-resisting Element for Life Threatening Earthquake Risk – Високоміцний конструктивний елемент для захисту від загрозливого для життя сейсмічного ризику) [27]. Проект SHELTER є спільним підприємством між Вищим технічним інститутом (інженерний факультет Лісабонського університету), Teixeira Duarte – Engenharia e Construções SA (португальський міжнародний будівельний підрядник), за технічної підтримки LNEC – Національної лабораторії цивільної інженерії та UNIDCOM/IADE – Факультету дизайну, технологій та комунікацій Європейського університету в Лісабоні. Проект об’єднав мультидисциплінарну команду, що інтегрує досвід дослідників та практиків у галузях цивільного та конструкційного будівництва, машинобудування, електроніки, архітектури, промислового дизайну, ергономіки, медицини та психології.

Поширені, часто неофіційні поради щодо безпеки – шукати укриття під міцним столом, у дверному прорізі або на сходовій клітці – неявно визнають потребу в безпечному місці всередині будівлі. Однак у випадку глобального обвалення конструкцій жодне таке місце в будівлі звичайної конструкції не може вважатися справді безпечним. Фундаментальною метою проекту SHELTER є інженерна

розробка та створення такого гарантованого життєзахисного простору, укріпленого ядра всередині основної конструкції будівлі, з одночасною інтеграцією комплексу допоміжних систем для задоволення повного спектру вимог до виживання та порятунку людей після катастрофічної події.

Пропоноване рішення сейсмічного прихистку задумане як модульний, високоміцний елемент, призначений для архітектурної інтеграції в центральному, доступному місці житлової квартири, офісу чи іншого приміщення з перебуванням людей. Його проектна мета – забезпечити виживання людей незалежно від механізму руйнування будівлі-носія, чи то локальне обвалення з падінням уламків, чи повне, прогресуюче глобальне обвалення. Для досягнення цього система повинна відповідати суворому набору критеріїв роботоздатності:

Гранична механічна міцність та жорсткість конструктивної системи прихистку повинна бути розрахована на витримування екстремальних сценаріїв навантаження, що значно перевищують звичайні розрахункові навантаження для будівель. Це включає опір величезним статичним і динамічним силам, що передаються під час прогресуючого обвалення несучих конструкцій будівлі. Проект повинен враховувати ударні навантаження високої інтенсивності від падіння плит перекриття та конструктивних елементів, а також тривалий тиск від ваги будівельних уламків. Конструктивна система повинна мати достатню жорсткість для збереження своєї об’ємної цілісності та запобігання роздавлюванню, забезпечуючи життєздатний внутрішній простір. Це досліджується за допомогою передового чисельного моделювання, включно з нелінійним скінченно-елементним аналізом (МСЕ) та методом граничних елементів (МГЕ), для симуляції динаміки прогресуючого обвалення та взаємодії з уламками [28, 29]. Використовувані моделі матеріалів враховують руйнування та розтріскування бетону, плинність та розрив сталі, а також складну механіку уламків як сипучого середовища [30 – 32]. Прикладені навантаження визначаються на основі власної ваги вищерозташованих конструкцій, як визначено нормами, наприклад EN 1991 [33].

Окрім загальної міцності конструкції, система повинна захищати людей від значних інерційних сил, що виникають під час обвалення. Обвалення

багатоповерхової будівлі передбачає сценарій вільного або майже вільного падіння, що призводить до екстремальних уповільнень при ударі об землю або нижні шари уламків. Прихисток повинен містити внутрішню систему гасіння удару, як-от безпечні крісла, встановлені на еластомерних опорах, або демпфовану систему підлоги. Проектна мета цієї системи – керувати кінетичною енергією падіння та обмежувати пікове прискорення (перевантаження), яке відчувають люди, до рівнів, нижчих за встановлені межі людської витривалості до критичних травм хребта та внутрішніх органів [34, 35].

Прихисток повинен забезпечувати придатне для життя середовище для людей, які можуть бути заблоковані на кілька днів до прибуття рятувальників. Це вимагає інтеграції комплексних систем життєзабезпечення, що задовольняють фізіологічні та психологічні потреби. Ці системи включають подачу та циркуляцію повітря для дихання (ОВК), контроль рівня вуглекислого газу, запаси питної води та продуктів тривалого зберігання, а також санітарну систему утилізації відходів. Крім того, критично важливим є пом’якшення сильного психологічного стресу від перебування в замкненому просторі, як-от посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) [36]. Це передбачає врахування мінімального освітлення, ергономічного внутрішнього планування та, що найважливіше, системи зв’язку (наприклад, аварійного радіомаяка для визначення місцезнаходження – EPIRB, або супутникового месенджера) для передачі сигналу лиха з даними про місцезнаходження та потенційно для двостороннього зв’язку з рятувальними командами.

Рішення не може бути універсальним продуктом. Воно повинно бути розроблене як модульна система, яку можна адаптувати до різноманітних габаритних та конструктивних обмежень існуючих будівель. Прихисток має бути конфігурованим для розміщення в межах типових конструктивних кроків та планів поверхів з мінімальним втручанням у існуючу несучу систему будівлі та її функціональний простір.

Для широкого визнання рішення його наявність не повинна надмірно погіршувати естетичну та функціональну якість житлового або робочого простору. Проект спрямований на безшовну архітектурну інтеграцію, потенційно маскуючи

прихисток під функціональний елемент, як-от шафа, невеликий кабінет або перегородка.

Методологія монтажу повинна бути оптимізована для швидкості та мінімальної інвазивності. Це вказує на будівельний підхід, заснований на збірних (заводського виготовлення) компонентах, що збираються на місці з мінімальними «мокрими» процесами (наприклад, монолітним бетонуванням). Мета – уможливити монтаж без необхідності тривалої евакуації та переселення мешканців будівлі.

Ключовим рушієм проекту є надання рішення для безпеки життя за вартістю, що на порядок нижча за вартість комплексного сейсмічного підсилення всієї будівлі. Кінцевий продукт має бути доступним для широких верств населення, включно з окремими сім’ями, малим бізнесом та іншими організаціями, представляючи переконливе співвідношення «витрати-вигода» для зниження ризиків.

2.7 Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Хоча концепція особистого захисту під час вибухової дії не є новою, існуючі рішення не здатні комплексно вирішити складні вимоги до виживання під час значного руйнування конструкцій у міському середовищі. Огляд аналогів виявляє дві основні категорії рішень: укріплені меблі та зовнішні бункери.

Кілька запатентованих та комерційно доступних рішень складаються з підсилених меблів, призначених для захисту людей від падіння уламків. Прикладами є сейсмостійкий стіл, розроблений Артуром Бруттером [37], сталеві посилені столи від LifeGuard Structures [38]. Схожою концепцією є eQuakeSafe Shelter Box – важко армований елемент, який може слугувати столом [39].

Фундаментальним проектним недоліком цих рішень є їх обмежена сфера захисту. Вони розроблені для протистояння локальним ударам низької та середньої енергії від ненесучих компонентів, як-от падіння штукатурки, стельових плит або заповнення з кам’яної кладки. Вони є конструктивно недостатніми, щоб витримати загальні динамічні навантаження та величезні сили роздавлювання, пов’язані з

прогресуючим обваленням багатоповерхової будівлі. У сценарії поповерхового обвалення такий предмет меблів, навіть якщо він збереже власну цілісність, зазнає екстремальних прискорень та ударів під час падіння разом із зруйнованою конструкцією, що робить виживання людей вкрай малоймовірним. Крім того, ці рішення пропонують дуже обмежений внутрішній об’єм, що спричинило б сильну клаустрофобію та психологічний стрес протягом багатоденного ув’язнення. Вони зазвичай розраховані на одну або дві особи, не враховуючи потреби сімей або груп, і потенційно посилюючи паніку через розлучення з близькими.

Рисунок 2.1 – Сейсмостійкий стіл, розроблений Артуром Бруттером [37]

а) б)

в) г)

Рисунок 2.2 – Сейсмостійкі меблі LifeGuard Structures [37]: а) меблі для інвалідних візків; б) стіл-вертушка; в) робочий стіл; г) Компактний письмовий стіл.

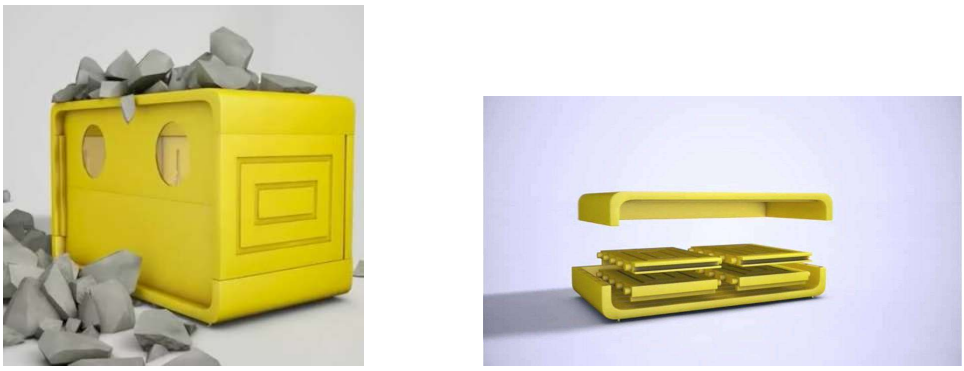


Рисунок 2.3 – eQuakeSafe Shelter Box – важко армований елемент, який може слугувати столом

Фундаментальним проектним недоліком цих рішень є їх обмежена сфера захисту. Вони розроблені для протистояння локальним ударам низької та середньої енергії від не несучих компонентів, як-от падіння штукатурки, стельових плит або заповнення з кам’яної кладки. Вони є конструктивно недостатніми, щоб витримати загальні динамічні навантаження та величезні сили роздавлювання, пов’язані з прогресуючим обваленням багатоповерхової будівлі. У сценарії поповерхового обвалення такий предмет меблів, навіть якщо він збереже власну цілісність, зазнає екстремальних прискорень та ударів під час падіння разом із зруйнованою конструкцією, що робить виживання людей вкрай малоймовірним. Крім того, ці рішення пропонують дуже обмежений внутрішній об’єм, що спричинило б сильну клаустрофобію та психологічний стрес протягом багатоденного ув’язнення. Вони зазвичай розраховані на одну або дві особи, не враховуючи потреби сімей або груп, і потенційно посилюючи паніку через розлучення з близькими.

Друга категорія – це зовнішні прихистки бункерного типу включає міцні, схожі на бункери споруди, призначені для встановлення поза будівлею. Компанії, як-от Atlas Survival Shelters, пропонують модулі з потужним сталевим каркасом, призначені для підземної або наземної установки [40]. Південнокорейський виробник бункерів Chumdan Bunker System пропонує плавучу, герметичну капсулу, призначену для витримування як землетрусів, так і цунамі, оснащену складними системами життєзабезпечення [41].

Рисунок 2.4 – Бункери заднього двору від Atlas Survival Shelters [40]

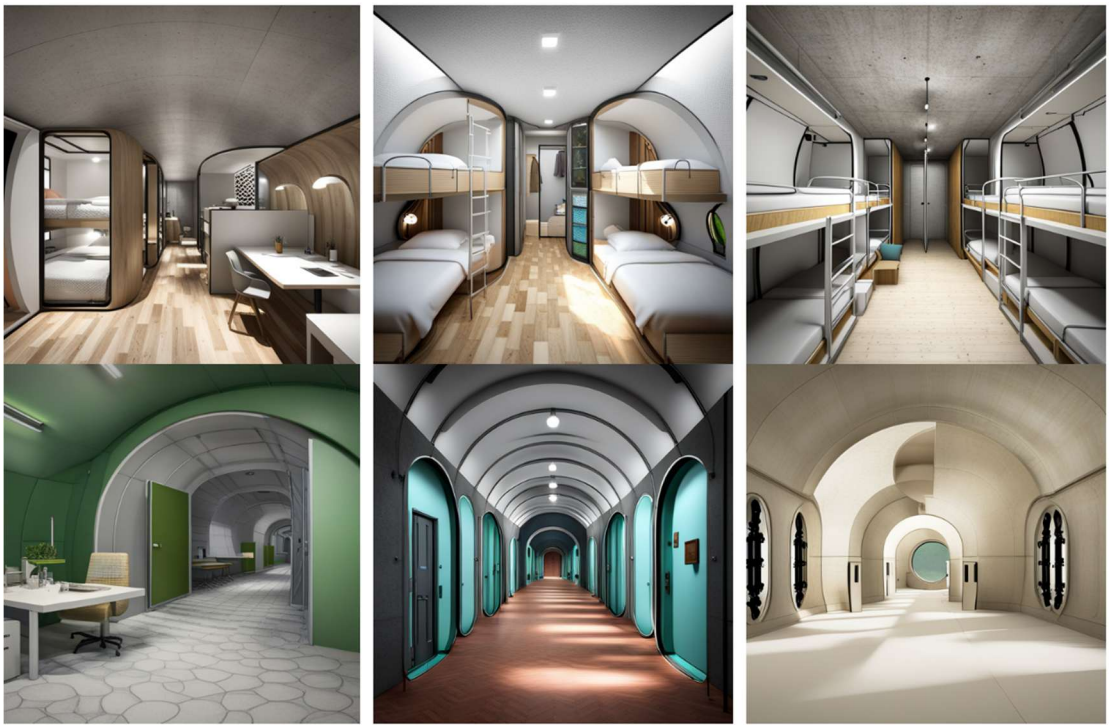


Рисунок 2.4 – Бункери від Chumdan Bunker System [41]

Хоча ці системи пропонують вищу міцність конструкції, їхнім головним обмеженням є непридатність для умов щільної багатоповерхової міської забудови. Час евакуації з верхнього поверху житлового чи офісного будинку до зовнішнього прихистку значно перевищує кілька секунд резерву часу, що надаються локальною

системою раннього оповіщення. Логістична складність виходу робить їх неефективними для тієї частини населення, яка перебуває у зоні найбільшого ризику. Більше того, в центрах міст зазвичай немає вільного приватного зовнішнього простору або земельної ділянки поруч з будівлею для такого монтажу. Тому ці рішення більше підходять для приватних будинків у приміських або сільських районах з наявною землею.

2.8 Вітчизняні підходи до проектування протиуламкових захисних споруд

Війна в Україні характеризується масованим застосуванням балістичних і крилатих ракет, а також ударних дронів, що призводить до значних руйнувань житлового фонду та об’єктів інфраструктури. Дослідження наслідків цих атак показують, що основну небезпеку для людей та конструкцій становлять не лише прямі влучання, а й ударна хвиля та уламкове поле, що утворюється при детонації вибухівки.

Аналіз руйнувань будівель, зокрема панельних багатоповерхівок, свідчить про їхню низьку стійкість до вибухових навантажень, що часто призводить до прогресуючого обвалення. Науковці зазначають, що залізобетонні конструкції, особливо монолітні, демонструють кращу здатність до перерозподілу навантажень і запобігання каскадним руйнуванням порівняно з цегляними або панельними будівлями. Дослідження, проведені Київською школою економіки спільно з державними інституціями, надають детальну статистику щодо прямих збитків інфраструктури, що дозволяє оцінити масштаби руйнувань та визначити найбільш вразливі типи об’єктів. Ця інформація є вихідними даними для формування вимог до нових захисних споруд.

З початком повномасштабної війни в Україні відбувся кардинальний перегляд нормативної бази у сфері цивільного захисту. Ключовим документом стали нові Державні будівельні норми ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту» [42], які набули чинності 1 листопада 2023 року, замінивши застарілий стандарт 1997 року. Нові норми встановлюють вимоги до проектування та будівництва сховищ, протирадіаційних укриттів та споруд подвійного призначення.

Важливою новацією ДБН В.2.2-5:2023 є вимога розраховувати конструкції на дію додаткових навантажень, включаючи динамічні, що імітують вплив ударної хвилі. Документ також допускає використання прямого динамічного аналізу для розрахунку конструктивних систем. Разом з тим, фахівці зазначають, що нові ДБН фактично урівнюють вимоги до сховищ та укриттів, що ускладнює будівництво швидких та масових рішень, і потребують подальшого вдосконалення, зокрема в частині інклюзивності.

Паралельно з основними ДБН, в Україні активно розробляються та впроваджуються концепції швидкоспоруджуваних захисних споруд модульного типу, які призначені для захисту від уламків та вибухової хвилі на зупинках громадського транспорту та біля житлових будинків. Саме цим переспективним спорудам присвячена ця робота.

Основою для проектування споруд, що зазнають динамічних навантажень, є метод скінченних елементів (МСЕ). Цей чисельний метод дозволяє моделювати складні фізичні процеси, розбиваючи конструкцію на сітку простих елементів і розв`язуючи для них системи рівнянь. Сучасні програмні комплекси, такі як LS-DYNA, ABAQUS, ANSYS, FreeCAD, а також вітчизняні ЛІРА-САПР та SCAD Office, реалізують МСЕ для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій під дією вибухових та ударних навантажень.

У міжнародній практиці накопичено значний досвід моделювання поведінки залізобетонних елементів під дією вибуху. Дослідження зосереджені на точному описі нелінійної поведінки бетону та сталі, врахуванні ефектів високої швидкості деформації, моделюванні утворення тріщин, відколювання та перфорації. Для коректного моделювання вибуху використовуються спеціалізовані алгоритми, наприклад ConWep, що дозволяють прикладати до моделі тиск ударної хвилі в часі. Окремим напрямком є моделювання прямого удару уламків, що вимагає використання складних контактних алгоритмів та моделей руйнування матеріалів.

Традиційним матеріалом для захисних споруд є залізобетон, який завдяки своїй масивності та міцності добре протистоїть вибуховим навантаженням. Дослідження показують, що використання подвійної арматурної сітки значно підвищує стійкість

залізобетонних плит до вибухових навантажень порівняно з одинарним армуванням або неармованим бетоном.

Для підвищення захисних властивостей розробляються та досліджуються нові матеріали та конструктивні підходи застосування багатошарових композитних модульних конструкцій. Застосування систем, що складаються з кількох шарів, є ефективним методом для захисту від уламків. Наприклад, зовнішній пре-детонаційний шар провокує підрив боєприпасу на відстані, а внутрішній масивний шар поглинає енергію вибуху та затримує уламки. Сучасні композитні матеріали: Досліджується ефективність панелей з арамідних, скляних та поліетиленових волокон для захисту від уламків. Такі матеріали можуть використовуватися як додатковий захисний шар всередині приміщень. В Україні набули поширення готові модульні укриття з бетону та залізобетону, які можна швидко встановлювати у потрібних місцях. У місті Суми представлені споруди від SafePlace, ARCA-NOVA, Товариства Червоного Хреста України ті інші.

Мобільні укриття від ініціативи сайту SafePlace.com.ua мають наступні характеристики:

– Конструкція та Матеріали: Укриття являють собою мобільні конструкції, виготовлені з важкого армованого бетону С32/40. Вони призначені для захисту від уламків та обстрілів.

– Розміри та Товщина: Товщина стін та стелі: 310 мм. В інших джерелах вказується товщина стін понад 25 см, а стелі – понад 40 см. Товщина підлоги: 150 мм.

– Місткість: Існують варіанти укриттів, розраховані на різну кількість людей: 12 осіб, 18 осіб та 24 особи.

– Обладнання: Укриття оснащені броньованими дверима, лавами для сидіння, освітленням та вентиляцією. Всередині також передбачені місця для дитячих візків.

Ці споруди є мобільними і встановлюються в громадських місцях, таких як парки, сквери та зупинки громадського транспорту, за допомогою крана.

Рисунок 2.5 – Мобільні укриття від ініціативи SafePlace.com.ua

Укриття ARCA-NOVA.

Існують різні моделі укриттів ARCA-NOVA, розраховані на різну кількість людей.

ARCA-NOVA на 7 осіб:

– Зовнішні габарити (з тамбурами): 3,20 х 2,40 х 3,20 м.
– Внутрішні розміри (корисна площа): 2,50 х 1,70 х 2,50 м.
– Корисна площа: 4,25 м^2.
– Товщина стін та стелі: 350 мм.
– Вага: 33 т.

ARCA-NOVA 6.0 на 17 осіб:

– Зовнішні габарити (з тамбурами): 6,70 х 4,00 х 3,50 м.
– Внутрішні розміри (корисна площа): 6,00 х 1,70 х 2,50 м.
– Корисна площа: 10,2 м^2.
– Товщина стін: 350 мм.
– Товщина стелі: від 350 мм.
– Вага: 97 т.

ARCA-NOVA на 27 осіб:

– Зовнішні габарити: ширина від 3,2 м, довжина – від 2,4 м до 10+ м (залежно від кількості людей), висота – 3,2 м.

– Внутрішні розміри: ширина від 2,5 м, довжина – від 1,7 м до 10+ м, висота – 2,5 м.

– Товщина стін та стелі: від 350 мм.

Укриття «Sota Compact Nova 2»

Характеристики моделі на 8 осіб:

– Ширина: 1400 мм (1,4 м).

– Довжина: 2962 мм (2,96 м).

– Висота: 2332 мм (2,33 м).

– Корисна площа: 4,15 м^2.

– Матеріали: Каркас з профільної труби товщиною 6 мм, стіни заповнені армованим бетоном товщиною від 60 мм.

Ці укриття розроблені відповідно до українських державних стандартів (ДБН та ДСТУ) і призначені для захисту від уламків та вибухової хвилі.

Рисунок 2.6 – Мобільні укриття від ініціативи ARCA-NOVA

Мобільні укриття, що встановлюються за підтримки Товариства Червоного Хреста України в різних регіонах, зокрема в Херсонській, Миколаївській, Запорізькій та Одеській областях, мають стандартизовані характеристики. Згідно з офіційними повідомленнями, ці захисні споруди мають такі розміри та параметри:

– Площа: Кожна конструкція має площу 10 м².

– Місткість: Укриття розраховане на одночасне перебування від 10 до 15 осіб.

Ці споруди є протиуламковими та призначені для захисту людей від вибухових хвиль та уламкових поранень у місцях масового скупчення, таких як зупинки громадського транспорту, ринки, автостанції та біля закладів охорони здоров'я.

Проект зі встановлення цих мобільних укриттів реалізується Українським Червоним Хрестом за фінансової підтримки міжнародних партнерів, зокрема Європейського Союзу, Данського Червоного Хреста та Німецького Червоного Хреста.

Варто зазначити, що окрім встановлення нових мобільних укриттів, Червоний Хрест також підтримує ремонт та облаштування вже існуючих захисних споруд у школах та житлових будинках, розміри яких можуть відрізнятися.

Рисунок 2.7 – Мобільні укриття від ініціативи Товариства Червоного Хреста України

Рисунок 2.7 – Мобільні укриття від інших ініціатив

2.9 Висновки за другим розділом

1. Війна в Україні виявила системну неспроможність як міжнародних гуманітарних норм, так і застарілих інженерних підходів до захисту цивільного населення. Такі евристики, як «правило двох стін», хоч і є корисними, виявилися недостатньо ефективними проти потужних боєприпасів, що призводять до прогресуючого обвалення цілих секцій будівель.

2. Досвід Ізраїлю демонструє ефективність комплексної системи пасивної оборони, що включає захищені житлові ядра (Мамади), модульні укриття та зміцнення інфраструктури. Однак пряме копіювання цих рішень є неможливим, що вимагає розробки власної методологічної бази, адаптованої до специфічних загроз та умов України.

3. Аналогія з сейсмічним проектуванням показує, що комплексне підсилення всього існуючого фонду будівель є економічно та логістично нереалістичним. Перспективною альтернативою є концепція, закладена в проекті SHELTER, – створення локалізованих, високоміцних захисних ядер всередині будівель, здатних витримати повне обвалення конструкції та забезпечити виживання людей.

4. Проаналізовані технічні рішення, такі як посилені меблі та зовнішні бункери, є неадекватними для умов щільної міської забудови. Перші не здатні протистояти навантаженням від прогресуючого обвалення, а другі є недоступними для мешканців багатоповерхових будинків через тривалий час евакуації та відсутність місця для встановлення.

5. В Україні вже відбувається активний процес реагування на нові виклики: прийнято нові ДБН В.2.2-5:2023, що враховують динамічні навантаження, та масово впроваджуються швидкоспоруджувані протиуламкові укриття модульного типу (SafePlace, ARCA-NOVA та ін.). Це свідчить про гостру практичну потребу в ефективних та швидких інженерних рішеннях.

Кінцевою метою є науково обґрунтований вибір та призначення об’єктів для захисту цивільного населення від балістичних атак та атак баражуючими боєприпасами в урбанізованих зонах, забезпечуючи максимальну структурну стійкість та виживання населення. Саме тому застосування науково-обґрунтованого інженерного підходу до проектування протиуламкових укриттів є надзвичайно актуальним. Роботу присвячено переосмислення процесів структурного аналізу та проектування протиуламкової захисної споруди без герметизації внутрішнього простору, з використанням платформи FreeCAD та її інтегрованих можливостей для аналізу методом скінченних елементів (МСЕ).

Такий підхід дозволяє:

– Об’єктивно оцінити необхідну товщину огороджувальних конструкцій на основі перевірених емпіричних формул, що враховують конкретні параметри загрози.

– Промоделювати вплив динамічних навантажень від вибухової хвилі та визначити критичні напруження в конструкції.

– Оптимізувати проектні рішення, забезпечивши необхідний рівень захисту при раціональному використанні матеріалів, часу та фінансових ресурсів.

РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ БАР'ЄРУ ПРОТИ БАЛІСТИЧНОГО УДАРУ

Навантаження та впливи, яких зазнають конструкції під час військових дій, мають свої особливості [43]. Це зумовлено тим, що конструкції промислових та цивільних будівель і споруд не розраховувалися на впливи та навантаження, що виникають внаслідок бойових дій, а саме:

– дія ударної хвилі вибуху;

– механічні пошкодження внаслідок влучання ракет, снарядів, їхніх уламків та уламків зруйнованих конструкцій;

– динамічні навантаження внаслідок дії вибухової хвилі або коливань конструкцій;

– температурні впливи внаслідок пожеж.

Особливістю впливу вибуху на будівельні конструкції є поєднання постійних та тимчасових навантажень із потужними короткочасними динамічними навантаженнями від вибухових впливів, що мають довільну просторову орієнтацію. Об'єкти, які з високою ймовірністю можуть зазнати впливу вибухів, слід розраховувати на особливі сполучення навантажень. Проте в будь-якому випадку необхідно розрахунками підтверджувати, що навантаження від вибуху перевищують природні навантаження. В роботі постулюється, що навантаження від вибуху перевищують природні навантаження.

3.1 Товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом

На початковому етапі визначається необхідна товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом на основі емпіричних моделей. Вони отримані шляхом апроксимації кривих за даними випробувань з обстрілу снарядами, тому застосування емпіричних моделей критично залежить від діапазонів охоплених випробовуваннями параметрів.

Діючі норми ДБН 2.2-5:2023 [42] обмежують використання важких класів бетонів. Для виготовлення бетонних, залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій слід використовувати важкий бетон, середня густина якого становить не менше 2000 кг/м³. Клас бетону має бути не нижчим за С12/15. Для колон та ригелів вимоги вищі – клас бетону не нижче С20/25. Бетонні стінові блоки повинні виготовлятися з бетону класу не нижче С8/10. Розчин, що використовується для замуровування стін зі збірних елементів, повинен мати марку не нижче С8/10.

При розрахунках конструкцій на аварійну ситуацію використовуються спеціальні розрахункові опори бетону. Відповідно до ДБН В.2.6-2009 [44], опір на осьовий стиск приймається як $f_{ck,prism}$, а на осьовий розтяг – як $f_{ctk,0,95}$.

Характеристичні значення міцності (призмова міцність на стиск та міцність на осьовий розтяг) визначаються на основі класу бетону (С) згідно з таблицею 3.1 ДБН В.2.6-2009. Розрахункова міцність бетону на стиск і розтяг визначається за правилами, викладеними в пункті 3.1.5 ДБН В.2.6-2009. У разі потреби, розрахункові значення міцності бетону коригуються шляхом множення на коефіцієнти умов роботи γ_{ci}. *Обираємо найдешевший допустимий до використання в усій конструкції С20/25.*

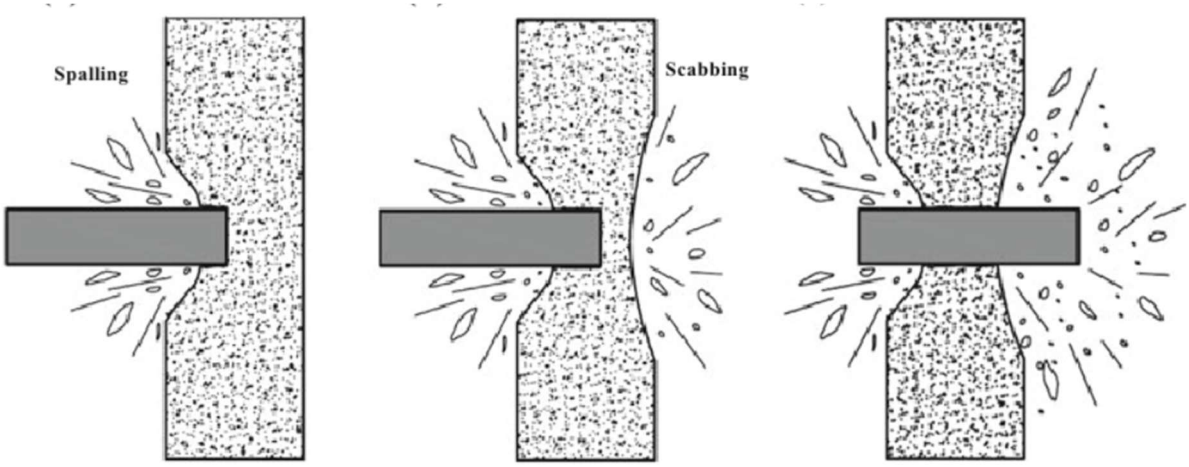
Ефекти проникнення та вторинного сколювання обмежують мінімальну товщину одношарової конструкції на пробиття (проникнення).Для прийнятого в конструкції бетону важкого С25/30 він складає 320 мм (за таблицею 14.13 ДБН В.2.2-5:2023 [42]). *Також для армування приймаємо за рекомендаціями ДБН В.2.6-98 арматуру класу А500С серед допустимих А400С, А500С та В500 у зварних сітках і каркасах.*

В аналізі застосовуються емпіричні формули Комітету з досліджень національної оборони (NDRC) [45]. Ці формули, отримані в результаті численних балістичних випробувань залізобетонних панелей, є стандартною практикою при проектуванні захисних споруд від ударів снарядів та уламків, особливо в таких галузях, як атомна енергетика. Вони дозволяють прогнозувати три критичні стани руйнування:

– глибина проникнення – глибина, на яку снаряд занурюється в бетон;

– глибина розтріскування – товщина, за якої відбувається відрив та викид фрагментів бетону з внутрішньої поверхні;

– глибина пробиття – товщина, за якої снаряд повністю пробиває бар'єр.



а) б) в)

Рисунок 3.1 – Вплив снаряда на бетонну ціль [45]:
а) проникнення; б) розтріскування та в) пробиття.

$$\begin{cases} \dfrac{h_{прон}}{d} = 2 \cdot G^{0,5} \quad для \quad G \le 1; \\ \dfrac{h_{прон}}{d} = G + 1 \quad для \quad G > 1. \end{cases} \tag{3.1}$$

, де

$h_{прон}$ – глибина проникнення (depth of penetration, DOP), м;

d – діаметр хвостовика снаряда, м.

$$G = 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{N^* \cdot M}{d \cdot \sqrt{f_{cd}}} \cdot \left(\frac{V_0}{d} \right)^{1,8}; \tag{3.2}$$

, де

M – маса снаряда, кг;

f_{cd} – розрахункове значення міцності бетону на стиск, Па;

V_0 – початкова швидкість удару снаряда, м/с;

N* – коефіцієнт геометрії носової частини снаряда, який дорівнює 0,72, 0,84, 1,0 та 1,14 для плоскої, напівсферичної, тупої та дуже гострої носової частини снаряда відповідно.

$$\begin{cases} \dfrac{h_{проб}}{d} = 3{,}19 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right) - 0{,}718 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right)^2 \quad для \quad \dfrac{h_{прон}}{d} \le 1{,}35 \quad або \quad \dfrac{h_{проб}}{d} \le 3; \\ \dfrac{h_{проб}}{d} = 1{,}32 + 1{,}24 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right) \quad для \quad 1{,}35 < \dfrac{h_{прон}}{d} < 13{,}5 \quad або \quad 3 < \dfrac{h_{проб}}{d} < 18. \end{cases}, \quad (3.3)$$

де

$h_{поб}$ – товщина пробивання, м.

$$\begin{cases} \dfrac{h_{розтр}}{d} = 7{,}91 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right) - 5{,}06 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right)^2 \quad для \quad \dfrac{h_{прон}}{d} \le 0{,}65 \quad або \quad \dfrac{h_{розтр}}{d} \le 3; \\ \dfrac{h_{розтр}}{d} = 2{,}12 + 1{,}36 \cdot \left(\dfrac{h_{прон}}{d} \right) \quad для \quad 0{,}65 < \dfrac{h_{прон}}{d} < 11{,}75 \quad або \quad 3 < \dfrac{h_{розтр}}{d} < 18. \end{cases}, \quad (3.4)$$

$h_{розтр}$ – товщина розтріскування, м.

Згідно до [46] основна частка уражуючих уламків має масу від 0,5 до 10,0 г, а початкову швидкість – від 50 до 1400 м/с. Неправильна форма уламків сприяє швидкій втраті ними кінетичної енергії. Клінічне значення мають раніння, що супроводжуються пошкодженням порожнин, кровоносних судин і життєво важливих органів. При масі сталевих кульок та уламків ≤1,0 г та енергії порядку 26-58 Дж спостерігаються проникаючі поранення черепа, при 20-60 Дж – проникаючі поранення грудей з ураженням ребр, а при енергії 25-60 Дж – переломи трубчастих кісток кінцівок.

Вхідними параметрами є маса снаряда (M = 10 г), швидкість (V_0 = 1400 м/с) – це відповідає кінетичній енергії $T = \dfrac{m \cdot V_0^2}{2} = \dfrac{0{,}01 \cdot 1400^2}{2} \approx 9{,}8 \cdot 10^3\ Дж \approx 10\ кДж$, калібр середній (d = 15 мм), розрахункове значення міцності бетону важкого С25/30 на стиск (f_{cd} = 17 МПа) та коефіцієнт для тупо-загостреної форми носової частини (N* = 1,0).

Тоді

$$\frac{h_{прон}}{d} = 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1,0 \cdot 0,01}{0,015 \cdot \sqrt{17 \cdot 10^6}} \cdot \left(\frac{1500}{0,015} \right)^{1,8} + 1 \approx 6,144;$$

$$h_{прон} = \left(3,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1,0 \cdot 0,01}{0,015 \cdot \sqrt{17 \cdot 10^6}} \cdot \left(\frac{1500}{0,015} \right)^{1,8} + 1 \right) \cdot 0,015 \approx 0,1072\,м;$$

$$1,35 < \frac{h_{прон}}{d} = 7,144 < 13,5;$$

$$\frac{h_{проб}}{d} = 1,32 + 1,24 \cdot 7,144 \approx 10,179; \qquad (3.5)$$

$$h_{проб} = \left(1,32 + 1,24 \cdot 7,144\right) \cdot 0,015 = 0,1527\,м;$$

$$0,65 < \frac{h_{прон}}{d} = 7,144 < 11,75;$$

$$h_{розтр} = \left(2,12 + 1,36 \cdot 7,144\right) \cdot 0,015 = 0,1775\,м.$$

Приймаємо розрахункові товщини: глибину проникнення 107 мм, товщину пробиття 153 мм і товщину розтріскування 178 мм. Для забезпечення структурної цілісності при багаторазових влучаннях приймається консервативна проектувальна товщина 356 мм, що відповідає *подвійній* товщині розтріскування і є допустимою за ДБН В.2.2-5:2023. Зазначимо, що у малих відкритих (незаглиблених) спорудах цивільного захисту міста Суми проектувальна товщина склала 200 мм, що відповідає запасу за граничною дією усього на всього у 1,12 рази.

З архітектурних міркування передбачаємо вхідний тамбур-лабіринт для запобігання прямому влучанню уламків. Конструкція фундаменту проектується з урахуванням можливості проникнення снарядів під споруду, а його товщина попередньо приймається рівною товщині стін – 356 мм.

Конструкція входу має бути такою, що унеможливлює потрапляння уламків в середину укриття (рисунок 3.2). Заштриховані області відповідають області внутрішнього ураження осколками.

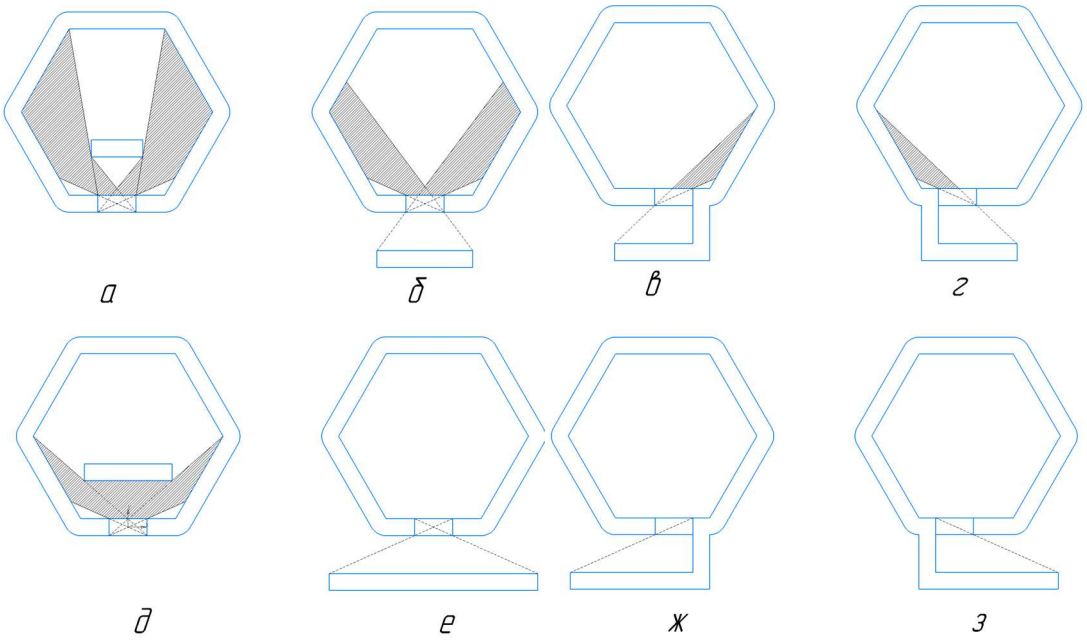


Рисунок 3.2 – Варіанти укриття при плануванні тамбура короткого та мінімально довгого за умовою лінійного неураження:

а) та д) тамбур всередині;

б) та е) тамбур зовнішній симетричний;

в) та ж) тамбур зовнішній з заходом проти годинникової стрілки;

г) та з) тамбур зовнішній з заходом за годинниковою стрілкою.

Модульна конструкція укриття передбачає групове розташування (рисунок 3.3). Заштрихована зона передбачається для розміщення людей, незаштрихована – прохідна.

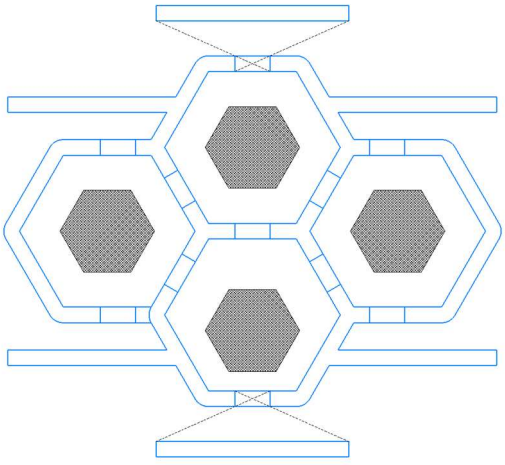


Рисунок 3.3 – Групове розташування модульного укриття

Товщину фундаменту можна визначити за такими емпіричними формулами:

$$H_ф = k_р \cdot \sqrt[3]{C} - 0{,}5 \cdot \cos(45°); \quad (3.6)$$

де $k_р$ – коефіцієнт руйнування, що дорівнює 0,40;

С – маса заряду, що підривається, кг, або

$$H_ф = 0{,}7 \cdot h_{розтр} = 0{,}7 \cdot 0{,}1775 \approx 0{,}124\,мм, \quad (3.7)$$

де $h_{розтр}$ – величина товщі бетону, за якої не вийде відколу при дії тієї бомби, на опір якої розраховується споруда, тобто товщина розтріскування, м.

Приймаємо товщину фундаменту рівною подвійній товщині розтріскування, тобто 0,355 м.

3.2 Аналіз вибухового навантаження

Споруда також повинна бути розрахована на опір надлишковому тиску від вибуху. Визначення вибухового навантаження через піковий надлишковий тиск на фронті ударної хвилі розраховується за емпіричною формулою Садовського, яка пов’язує тиск із масою заряду (в тротиловому еквіваленті) та відстанню до центру вибуху. Для невідомих типів вибухових речовин застосовується коефіцієнт тротилового еквіваленту 1,5.

Згідно з чинними будівельними нормами ДБН 2.2-5:2023 [42], у місцях щільної забудови дозволяється скорочувати стандартну відстань до захисних споруд від місця вибуху за певних умов посилення захисних властивостей: захисні споруди повинні бути модернізовані, щоб витримувати вищий надлишковий тиск, ніж той, що зазначений у таблицях 3.1 та 3.2.

Для зменшення відстані необхідно надавати відповідне обґрунтування. При цьому має бути врахований максимальний радіус збору населення, з якого люди збиратимуться до укриття.

Таким чином, можна будувати захисні споруди ближче до небезпечних об’єктів, якщо ці споруди зробити міцнішими, щоб вони могли витримати потужнішу вибухову

хвилю. Це рішення вимагає спеціального обґрунтування та врахування безпеки людей, які будуть евакуюватися до цих споруд.

Розглянемо проектний сценарій на основі даних таблиці 3.3 з урахуванням збільшення дальності розльоту осколків при сильному вітрі на 25-50%., аналіз передбачає детонацію С = 100 кг невідомої вибухової речовини на відстані R = 10 м. Зауважимо, що на момент написання роботи найбільшу небезпеку становило ураження безпілотними літальними апаратами з бойовою частиною у 100 кг. Вибір відстані має на увазі проектний випадок «безпосередньої близькості» фактору ураження. Якщо тип вибухівки невідомий, то коефіцієнт приведення до тротилового еквіваленту 1,5, тобто $С_{екв}$ = 150 кг.

Розглянемо вплив вибухової хвилі на конструкції будівель та споруд. Вибухова хвиля – це збурення особливого роду, що виникає в навколишньому середовищі під час вибуху (заряду вибухової речовини, пилу або газу). Йому властиве різке, стрибкоподібне підвищення тиску, що супроводжується стисненням, нагріванням та зміною швидкості руху середовища. Вибухова хвиля в повітрі – це фронт, що поширюється зі значною швидкістю 300 м/с та більше. Джерелом виникнення ударної хвилі є високий тиск у центрі вибуху, що можу сягати 10^5 Па. Вона складається із зони стиснення (де тиск вищий за атмосферний) та зони розрідження (де тиск нижчий за атмосферний). Уражальна дія ударної хвилі визначається двома параметрами: надлишковим тиском та швидкісним напором повітря.

Таблиця 3.1 – Класи сховищ та споруд подвійного призначення (СПП) із захисними властивостями сховищ.

№ з.п.	Розміщення сховищ, СПП із захисними властивостями сховищ	Клас сховища, СПП із захисними властивостями сховищ	Захисні властивості	
			Надмірний тиск повітряної ударної хвилі ΔP_{eX}, кПа	Ступінь послаблення радіаційного впливу (ступінь захисту) А
1	У межах проектної забудови міст, віднесених до групи особливої важливості цивільного захистуV	А-I	500	5000
2	Окремо розташований об’єкт суб’єкта господарювання, віднесеного до категорії особливої важливості цивільного захисту	А-II	300	3000
3	У межах проектної забудови та санітарно-захисної зони атомних енергетичних об’єктів	А-III	200	5000
4	У межах проектної забудови територій та населених пунктів, віднесених до відповідних груп цивільного захисту, а також за межами проектної забудови та санітарно-захисної зони атомних енергетичних об’єктів у зонах можливих значних (сильних) руйнувань	А-IV	100	1000

Таблиця 3.2 – Групи протирадіаційних укриттів (ПРУ) сховищ та споруд подвійного призначення (СПП) із захисними властивостями ПРУ.

Розміщення ПРУ та СПП із захисними властивостями ПРУ	Група укриття	Захисні властивості	
		Надмірний тиск повітряної ударної хвилі ΔP_{eX}, кПа	Коефіцієнт послаблення радіаційного впливу (коефіцієнт захисту) $K_з$
У містах, віднесених до груп цивільного захисту, інших населених пунктах розташованих:			
1. У зоні можливих значних (сильних) руйнувань	П-1	100	1000
У містах, не віднесених до груп цивільного захисту, інших населених пунктах, на об’єктах суб’єктів господарювання розміщених:			
2. У зоні можливих незначних (слабких) руйнувань навколо атомних енергетичних об’єктів	П-2	100	1000
3. На решті території зони можливого небезпечного сильного радіактивного забруднення навколо атомних енергетичних об’єктів	П-3	100	500
4. У 30-кілометровій зоні (зоні спостереження) навколо атомних енергетичних об’єктів, а також у зонах можливого небезпечного сильного радіактивного забруднення за межами зон можливих руйнувань	П-5	100	200
5. Поза межами зон можливого небезпечного сильного радіактивного забруднення	П-6	100	100
На об’єктах суб’єктів господарювання першої та другої категорії цивільного захисту, населених пунктах, розміщених:			
6. У зонах незначних (слабких) руйнувань	П-4	100	200

Таблиця 3.3 – Безпечні відстані при знищенні вибухонебезпечних предметів [47]

Калібр боєприпасів, мм	Вага підривного заряду тротилу, кг	Можлива дальність розльоту осколків, м
Боєприпаси до авіаційного автоматичного озброєння та ракети		
37-76	0,2-0,4	до 500
76-105	0,4 - 06	до 700
105-150	0,6-0,8	до 1000
150-200	0,8- 1,0	до 1200
200-300	1,0-2,0	до 1500
300-400	2,0-3,0	до 1500
більше 400	більше 0,300	до 1500
Авіаційні бомби		
до 10	0,2	до 500
до 50	0,4	до 850
до 100	0,6	до 1000
до 250	1,0	до 1200
до 500	1,6	до 1350
до 1000	2,0	до 1500
до 1500	2,4	до 1600
до 2000	3,0	до 1800
до 5000	5,0	до 2000

Обґрунтування форми укриття: надлишковий тиск [48] пропорційний коефіцієнту аеродинамічного опору C_{aer} для схеми вітрових навантажень традиційної прямокутної захисної споруди та правильного шестикутника відповідно. Тут зазначається форма в плані, бо математично строго було б казати «прямокутний паралелепіпед» та «пряма призма з основою у вигляді правильного шестикутника». Так коефіцієнти лобового опору $C_{x\infty}$ визначаються при набіганні вітру при

$\lambda_e = \frac{\lambda}{2} = \frac{l}{2 \cdot d} \longrightarrow \infty$ для схеми прилягання довгим боком до опори, які слід враховувати для окремих елементів і конструкцій при визначенні тієї складової загального опору тіла, яка діє в напрямку вітрового потоку і віднесена до площі проекції тіла на площину, перпендикулярну до потоку. Ці $C_{x\infty}$ складають від 1,6 до 2,1 для прямокутника і 1,5 для шестикутника (не змінюючись до 8) при числі Ренольдса $Re>4 \cdot 10^5$, що відповідає вибуховій хвилі. Теоретично границя $C_{x\infty}$ може сягати 1,0 для укриття у вигляді прямого круглого циліндра або дванадцятикутника. Виграш у зниженні опору нівелюється складністю побудови та приєднання таких елементарних модулів, що абсолютно не так для правильного шестикутника.

Нагадаємо, що аеродинамічні коефіцієнти C_{aer} наведені в додатку І ДБН В.1.2-2:2006, де стрілками позначений напрямок вітру. Знак «плюс» біля коефіцієнта відповідає напрямку тиску вітру на поверхню, знак «мінус» – від поверхні. Проміжні значення коефіцієнтів визначаються лінійною інтерполяцією.

Вибухова хвиля створює навантаження, що поширюється у вигляді фронту [43]. Зазвичай це навантаження (тиск на поверхні хвилі) діє перпендикулярно (нормально) до вертикальних поверхонь будівлі (стін, вікон, дверей) і поширюється з великою швидкістю. Найбільших пошкоджень від вибухової хвилі зазнають конструкції зовнішніх стін (стінові панелі, цегляна кладка, огороджувальні конструкції) та світлопрозорі конструкції (вікна, ліхтарі, ворота, двері).

Вплив ударних хвиль вибуху на різні конструкції будинків і споруд може бути значним. Деякі основні аспекти цього впливу включають: механічні ушкодження, деформацію матеріалів, порушення цілісності та напрямок поширення хвилі. Ефект впливу повітряних вибухових хвиль на споруди визначається видом вибуху: наземний, повітряний або вибух над поверхнею землі. Повітряна ударна хвиля складається з фази стиснення, в якій тиск вищий за атмосферний, і фази розрідження (рисунок 3.4).

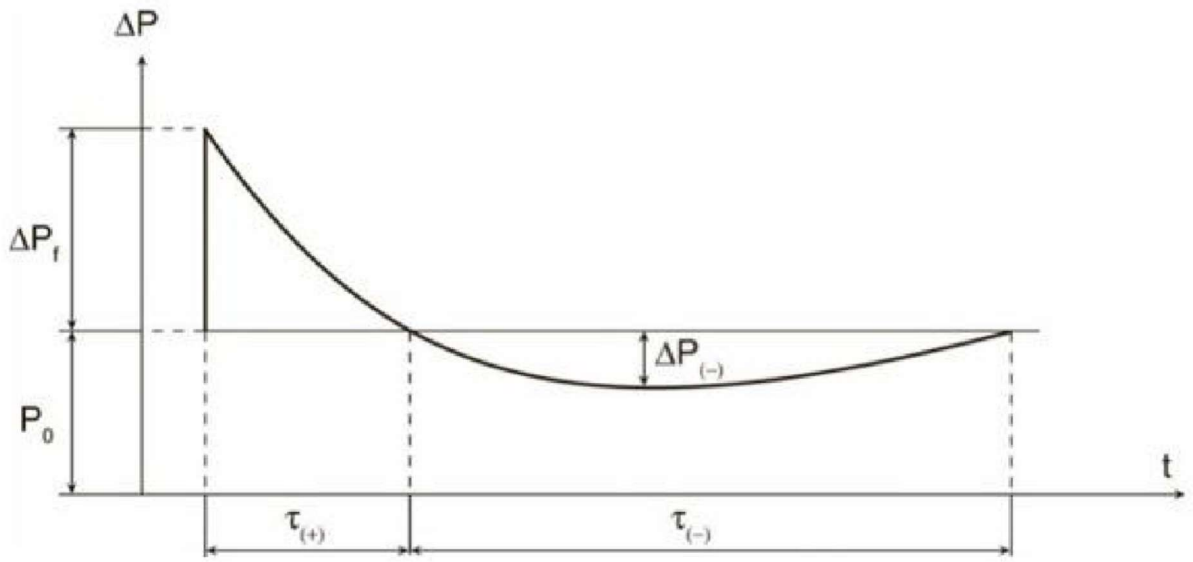


Рисунок 3.4 – Графік зміни тиску по фронту вибухової хвилі

Найбільший тиск у фазі стиснення вибухової хвилі значно перевищує атмосферний тиск і тиск у фазі розрідження. Основні параметри вибухової хвилі, що поширюється в повітрі від центру вибуху, визначаються за емпіричними формулами Садовського.

Випадок повітряного вибуху:

надлишковий тиск фази стиснення

$$\Delta P_f = 0,084 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}}}{R} + 0,27 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}^{\,2}}}{R^2} + 0,7 \cdot \frac{C_{екв}}{R^3} =$$
$$= 0,084 \cdot \frac{\sqrt[3]{150}}{10} + 0,27 \cdot \frac{\sqrt[3]{150^2}}{10^2} + 0,7 \cdot \frac{150}{10^3} \approx \quad (3.8)$$
$$\approx 0,225856\,МПа \approx 0,2259\,МПа;$$

тривалість фази стиснення

$$\tau_{(-)} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{C_{екв}} \cdot \sqrt{R} =$$
$$= 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{150} \cdot \sqrt{10} \approx 0,0109338506\,с \approx 0,01093\,с; \quad (3.9)$$

імпульс тиску у фазі стиснення

$$i = 6,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}^{\,2}}}{R} = 6,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{150^2}}{10} \approx 17,7856\,МПа \cdot с / м^2; \quad (3.10)$$

найбільший тиск відбиття

$$\Delta P_V = 2 \cdot \Delta P_f + \frac{6 \cdot \Delta P_f{}^2}{\Delta P_f + 0,72} = \\ = 2 \cdot 0,225856 + \frac{6 \cdot 0,225856^2}{0,225856 + 0,72} \approx 0,775298 МПа; \quad (3.11)$$

швидкість руху фронту

$$D_f = 340 \cdot \sqrt{1 + 8,3 \cdot \Delta P_f} = \\ = 340 \cdot \sqrt{1 + 8,3 \cdot 0,225856} \approx 576,458 м / с; \quad (3.12)$$

час від початку віддзеркалення до встановлення режиму обтікання

$$\Delta t_0 = \frac{3 \cdot H}{D_f} = \frac{3 \cdot 2,5}{576,458} \approx 0,0130105 c. \quad (3.13)$$

Випадок наземного вибуху:

надлишковий тиск фази стиснення

$$\Delta P_f = 0,1 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}}}{R} + 0,43 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}{}^2}}{R^2} + 1,4 \cdot \frac{C_{екв}}{R^3} = \\ = 0,1 \cdot \frac{\sqrt[3]{150}}{10} + 0,43 \cdot \frac{\sqrt[3]{150^2}}{10^2} + 1,4 \cdot \frac{150}{10^3} \approx \\ \approx 0,384527 МПа \approx 0,3845 МПа; \quad (3.14)$$

тривалість фази стиснення

$$\tau_{(-)} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{C_{екв}} \cdot \sqrt{R} = \\ = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{150} \cdot \sqrt{10} \approx 0,01239169735 \text{с} \approx 0,01239 \text{с} \quad (3.15)$$

імпульс тиску у фазі стиснення

$$i = 6,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{C_{екв}{}^2}}{R} = 6,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{150^2}}{10} \approx 17,7856 МПа \cdot с / м^2, \quad (3.16)$$

найбільший тиск відбиття

$$\Delta P_V = 2 \cdot \Delta P_f + \frac{6 \cdot \Delta P_f{}^2}{\Delta P_f + 0,72} =$$
$$= 2 \cdot 0,384527 + \frac{6 \cdot 0,384527^2}{0,384527 + 0,72} \approx \quad (3.17)$$
$$\approx 1,572263 МПа \approx 1,5722 МПа.$$

швидкість руху фронту

$$D_f = 340 \cdot \sqrt{1 + 8,3 \cdot \Delta P_f} =$$
$$= 340 \cdot \sqrt{1 + 8,3 \cdot 0,384527} \approx 696,093 \, м / с; \quad (3.18)$$

час від початку віддзеркалення до встановлення режиму обтікання

$$\Delta t_0 = \frac{3 \cdot H}{D_f} = \frac{3 \cdot 2,5}{696,093} \approx 0,0107744 \, c. \quad (3.19)$$

де $C_{екв}$ = 150 кг – маса тротилового еквіваленту; R = 10 м – відстань від центру вибуху; H = 2,5 м – мінімальний розмір серед висоти 3 м та половини ширини 2,5 м захисної споруди.

Найбільший тиск відбиття діє на початку спостереження на фронтальну пласку перешкоду у напрямку, перпендикулярному до розповсюдження хвилі. Далі тиск спадає за графіком на рисунку 3.5. Загалом дія вибуху на споруду показано на рисунку 3.6.

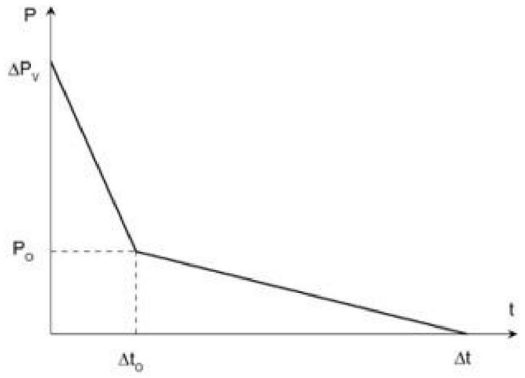


Рисунок 3.5 – Графік тиску вибухової хвилі на споруду

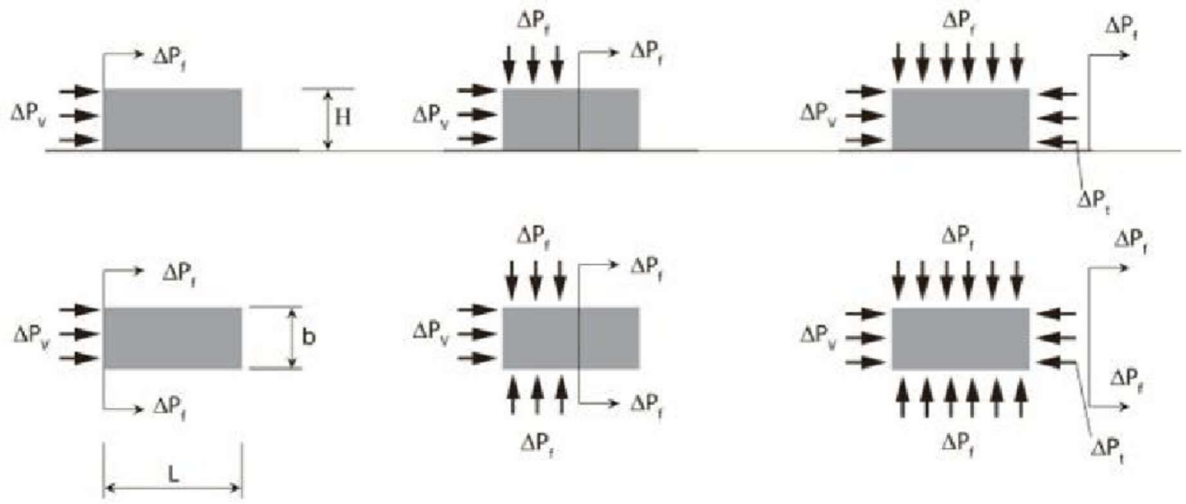


Рисунок 3.6 – Загальний вплив вибухової хвилі на споруду

Розраховані тиски для повітряного вибуху формулами (3.8) та (3.11) і для наземного вибуху (3.14) та (3.17) є надлишковими, бо укриття є проти осколковим і не передбачає встановлення герметичних дверей, тому вказані тиски обмежуються спроможностями людського організму. У статті [46], граничним є тиск 350 кПа. Цей тиск буде рівним тиску проскоку у приміщення через двері.

Якщо вибух стався зовні будівлі та в огороджувальних конструкціях є отвори, то повітряна ударна хвиля затікає через них, створюючи всередині динамічне навантаження. З часом тиск змінюється за графіком на рисунку 3.7.

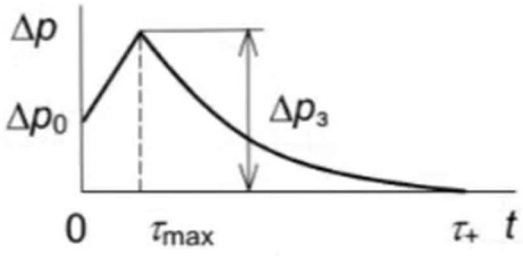


Рисунок 3.6 – Тиск при затіканні повітряної ударної хвилі

Значення Δp_0 («тиск проскоку») визначається за номограмою рисунок 3.7 залежно від тиску перед прорізами Δp_0 і параметра а, що представляє собою відношення площі прорізів до площі перешкоди. Якщо прорізи знаходяться на

фронтальній стіні, то тиск Δp_0 слід приймати рівним відбитому тиску; для решти поверхонь будівлі воно дорівнює тиску на фронті падаючої хвилі ΔP_f.

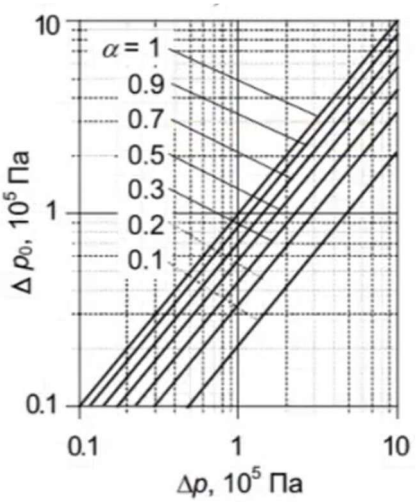


Рисунок 3.7 – Номограма визначення тиску проскоку Δp_0, Па

Максимальний тиск

$$\Delta p_з \approx \begin{cases} 0,8 \cdot \Delta p \ при \, \alpha \le 0,2 \\ 0,9 \cdot \Delta p \ при \, \alpha = 0,4 \end{cases} \tag{3.20}$$

Час зростання тиску до максимуму

$$\tau_{\max} \approx (0,1 \div 0,15) \cdot \tau_{(+)} \tag{3.21}$$

Менші значення для $\Delta p \ge 100 \, кПа$, більші – для $\Delta p \le 30 \, кПа$

За відношення площі дверей до стіни більше за 0,4, тиск на фронті ударної хвилі буде 385 кПа. Цей сценарій створює піковий надлишковий тиск близько 350 кПа. Його обрано розрахунковим, оскільки він відповідає тиску, що може спричинити руйнування негерметичних дверей та призвести до травмуючого внутрішнього тиску.

Взаємодія вибухової хвилі з конструкцією є складним, багатоетапним процесом згідно рисункам 3.5 та 3.6. взаємодія ударної хвилі із спорудою відбувається у три етапи: на першому етапі відбувається віддзеркалення ударної хвилі від фронтальної стіни споруди; на другому відбувається обтікання споруди ударною хвилею; на третьому - занурення споруди в ударну хвилю

Найкритичнішою фазою є початкове відбиття, під час якого тиск на фронті хвилі може посилюватися до 8 разів при перпендикулярному ударі об фасад споруди. Цей тиск відбиття є основним випадком навантаження для фронтальної стіни.

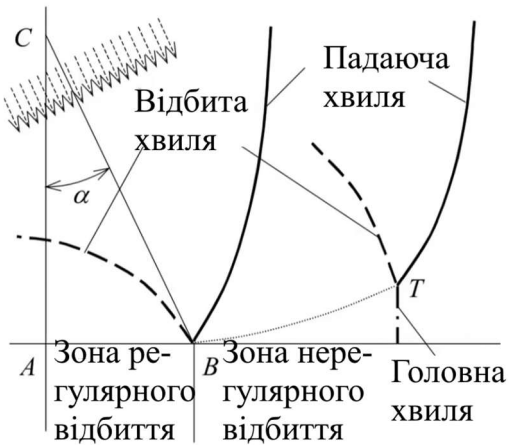


Рисунок 3.7 – Відбиття повітряної ударної хвилі від пласкої перешкоди при різних кутах падіння

За наявності прорізів у фронтальній стіні більших за 10% за площею формули (3.11) та (3.17) перетворяться на

$$\Delta P_{V\,10\%} = 2 \cdot \Delta P_f + \frac{2{,}5 \cdot \Delta P_f{}^2}{\Delta P_f + 0{,}72}, МПа. \qquad (3.17)$$

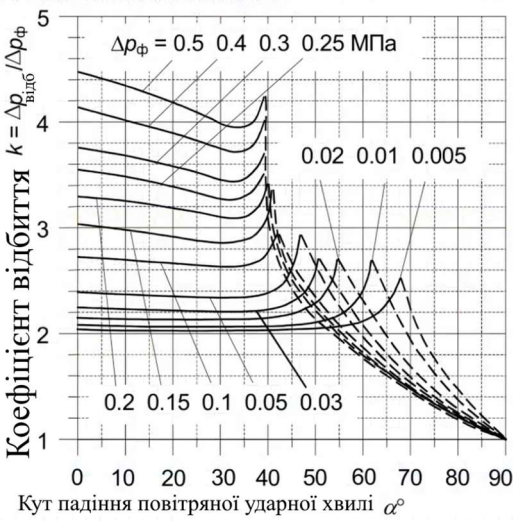


Рисунок 3.7 – Діаграма для визначення тиску відбиття повітряної ударної хвилі від пласкої перешкоди при різних кутах падіння

Звідси нормальний тиск віддзеркалення не є найбільшим, більшим може бути залежно від тиску на фронті ударної хвилі тиск віддзеркалення для кутів 40º – 70º, але в розрахунковому випадку, для 0,5 МПа, таки нормальний тиск є найбільшим.

Для спрощення динамічного аналізу короткочасне вибухове навантаження перетворюється на еквівалентне статичне. Це досягається шляхом множення розрахованого пікового тиску відбиття на коефіцієнт динамічності $К_д = 2,0$, як це передбачено для наземних об'єктів за ДБН В.2.2-5:2023 [44]. Таким чином для сховища розрахунковий квазістатичний тиск віддзеркалення становить 3,144 МПа.

3.3 Висновки за третім розділом

1. Визначено необхідну товщину конструкцій для захисту від уламків. На основі стандартних для оборонного проектування емпіричних формул NDRC було проведено розрахунок для розрахункової загрози – уламка масою 10 г зі швидкістю 1400 м/с. Аналіз показав, що для бетону класу С20/25 мінімальна товщина, що запобігає відколюванню фрагментів з внутрішньої поверхні (розтріскуванню), становить 178 мм. З метою забезпечення надійності та структурної цілісності при багаторазових влучаннях, було прийнято консервативне проектне рішення – товщина огороджувальних конструкцій (стін, покриття та фундаменту) становить 356 мм, що відповідає подвійній товщині розтріскування та узгоджується з вимогами ДБН В.2.2-5:2023.

2. Обґрунтовано архітектурно-планувальні рішення. Для мінімізації ризику прямого потрапляння уламків всередину споруди було запропоновано використання вхідного тамбура-лабіринту. Також було обґрунтовано вибір шестикутної форми укриття в плані, оскільки вона має менший коефіцієнт аеродинамічного опору порівняно з прямокутною, що дозволяє знизити навантаження від вибухової хвилі.

3. Розраховано проектне навантаження від вибуху. Для аналізу було обрано сценарій «безпосередньої близькості» – детонація 100 кг вибухової речовини (150 кг у тротиловому еквіваленті) на відстані 10 м. За допомогою формул Садовського було визначено параметри вибухової хвилі. Встановлено, що найкритичнішим є

початковий етап взаємодії, коли відбувається відбиття хвилі від фронтальної стіни споруди, що призводить до значного посилення тиску.

4. Визначено еквівалентне статичне навантаження для подальшого аналізу. З огляду на короткочасний динамічний характер вибухового навантаження, для спрощення подальшого скінчено-елементного моделювання було здійснено перехід до еквівалентного статичного навантаження. Шляхом застосування коефіцієнта динамічності $К_д$ = 2,0 до розрахованого пікового тиску відбиття, було отримано розрахунковий квазістатичний тиск, що діє на конструкцію, величиною 3,144 МПа.

4 РОЗРАХУНКОВА СКІНЧЕНО ЕЛЕМЕНТНА СИМУЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ УКРИТТЯ ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ У FREECAD

В роботі пропонується проведення виконання розрахунків на міцність залізобетонної споруди укриття цивільного призначення методом скінчених елементів у безкоштовному програмному комплексі FreeCAD [49].

FreeCAD є потужною та безкоштовною CAD-платформою з відкритим вихідним кодом, пропонує інструменти для розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) через наявний модуль FEM Workbench.

FreeCAD було обрано через безкоштовність та відкритий код; чудові інструменти для створення 3D-моделей бетонних конструкцій та детального армування за допомогою модуля Reinforcement Workbench; те, що він рекомендований для студентів та початківців для вивчення основ МСЕ та отримання загального уявлення про розподіл напружень у простих конструкціях у пружній зоні роботи.

Прийнято до уваги обмеження FreeCAD: відсутність інтеграції арматури в МСЕ; спрощене моделювання матеріалів; ігнорування спільної роботи композиційних матеріалів; високий поріг входу для нелінійного аналізу.

4.1 Моделювання геометрії та матеріалів: бетон та арматура

Побудовано універсальна конструкція модель укриття цивільного призначення за Рисунком 3.2 е. Лінійні розміри споруди приведено у таблиці 4.1. Слід зазначити, що твердотільну модель (Рисунок 4.1) побудовано параметрично з тим, щоб варіювати вказані лінійні розміри в межах дослідження.

Створення геометрії бетонних елементів у FreeCAD [49] є простим і інтуїтивно зрозумілим. Доступно моделюваня балок, колон, плит та стін, використовуючи стандартні інструменти твердотільного моделювання. Для аналізу МСЕ, зазвичай, всі окремі бетонні частини об’єднуються в єдиний суцільний об’єкт (fusion/solid).

Таблиця 4.1 – Лінійні розміри споруди

№	Лінійний розмір	Величина, мм
1	бічна сторона правильного шестикутника зсередини	3500
2	Товщина стін	350
3	Товщина стелі	350
4	Товщина фундамента	350
5	Висота стелі зсередини	2500
6	Ширина дверей	800
7	Висота дверей	2000
8	Ширина вхідного тамбура	1000
9	Довжина (бар’єра) вхідного тамбура	4300

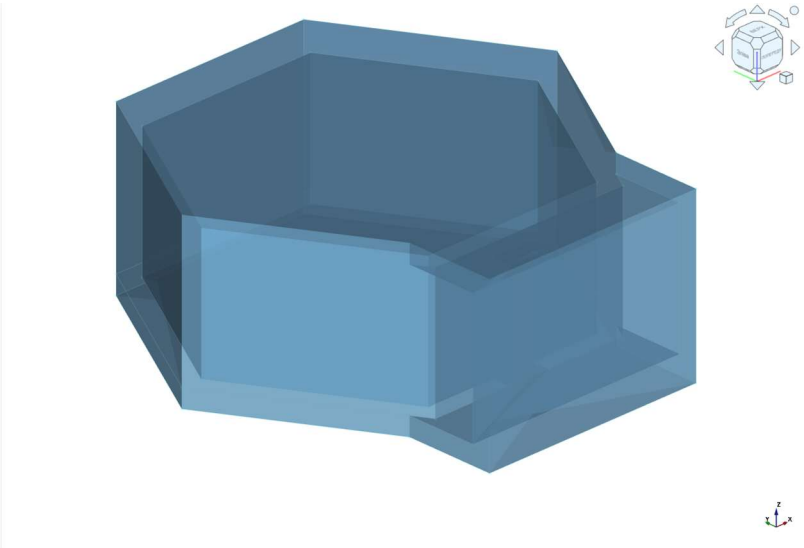


Рисунок 4.1 – Твердотільна модель укриття цивільного призначення

Для моделювання арматури застосовано спеціалізований додатковий модуль Reinforcement Workbench Цей модуль є досить потужним інструментом для детального 3D-моделювання арматурних каркасів, що дозволяє створювати: прямі, Г-подібні, П-подібні стержні; хомути та спіральну арматуру; розкладку арматури в балках, колонах та плитах з урахуванням захисного шару, діаметру та кроку.

Проте, особливістю є те, що цей модуль призначений переважно для моделювання та деталізації, а не для інтеграції в розрахунок МСЕ. Стандартний робочий процес у FEM Workbench не передбачає прямого способу перетворення цих 3D-моделей арматури в скінченні елементи (наприклад, стержневі), які були б коректно вбудовано в сітку суцільного бетонного тіла.

Найбільш суттєві обмеження FreeCAD для аналізу залізобетону лежать у площині моделювання матеріалів та самого процесу аналізу. В моделі застосовано лінійний аналіз, який дозволяє задавати базові лінійні пружні властивості для матеріалів, включаючи «узагальнений бетон» (Concrete-Generic). Цього достатньо для виконання спрощеного лінійного статичного аналізу, щоб отримати загальну картину розподілу напружень та деформацій за умови, що матеріал працює в пружній зоні. В роботі призначені такі властивості бетону важкого С25/30, як міцність, визначена на зразках-кубах $f_{ck.cube}$ = 30 МПа [50]; густина ρ = 2400 кг/м^3; модуль Юнга І-го роду E = 32·10^3 МПа; коефіцієнт Пуассона ν=0,14 [44]. Аналогічно визначено властивості сталевого армування бетону на основі «узагальненої сталі» (Steal-Generic)] для арматури класу А500С: тимчасовий опір σ = 500 МПа [51]; густина ρ = 7900 кг/м^3; модуль Юнга І-го роду E = 2·10^5 МПа; коефіцієнт Пуассона ν = 0,30.

Реалістичний розрахунок залізобетону вимагає врахування його нелінійної поведінки: розтріскування в розтягнутій зоні та пластичних деформацій і руйнування при стиску [52]. Хоча розв’язувач CalculiX [49], що використовується у FreeCAD, теоретично підтримує нелінійні моделі, графічний інтерфейс FEM Workbench має дуже обмежені можливості для їх задання. Користувач може лише визначити просту білінійну діаграму «напруження-деформації», але цього недостатньо для опису складної поведінки бетону. Впровадження просунутих моделей, таких як «Concrete

Damage Plasticity» (CDP), що є стандартом у комерційних пакетах (наприклад, Abaqus, ANSYS), у FreeCAD через стандартний інтерфейс неможливе.

Стандартний підхід до аналізу у FreeCAD базується на спрощеній моделі і вимагає об’єднання бетону та арматури в єдине тіло, що не відображає їхню спільну роботу як композитного матеріалу. Це повністю ігнорує ефект ковзання арматури відносно бетону (bond-slip), що є критично важливим для точного моделювання.

Досвідчені користувачі, до яких автор себе поки що не відносить, можуть обійти обмеження графічного інтерфейсу, вручну редагуючи вхідний файл для розв’язувача CalculiX (.inp). Це дозволяє теоретично задати складніші властивості матеріалів та визначити взаємодію між арматурою та бетоном. Однак, це вимагає глибоких знань синтаксису CalculiX і робить процес надзвичайно складним та недоступним для більшості інженерів.

4.2 Скінчено елементна модель та граничні умови до неї.

В роботі розв’язується тривимірна квазістатична задача лінійної міцності моделі укриття цивільного призначення [52]. Для цього твердотільну модель розбито на тетраедричні тривимірні скінчені елементи (Рисунок 4.2)

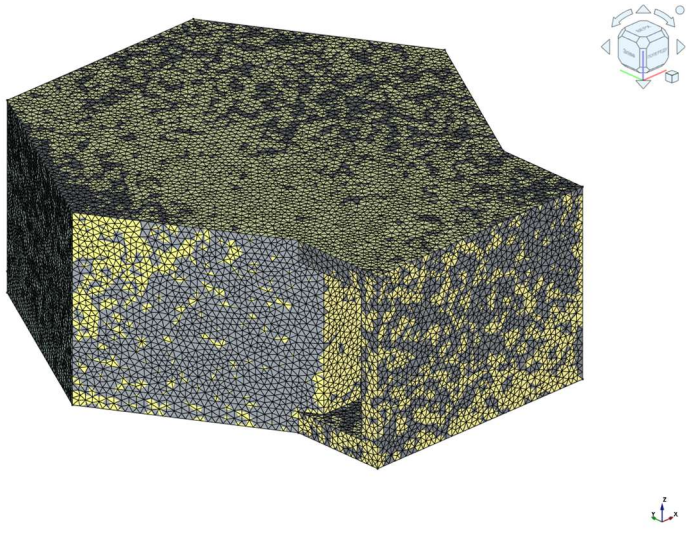
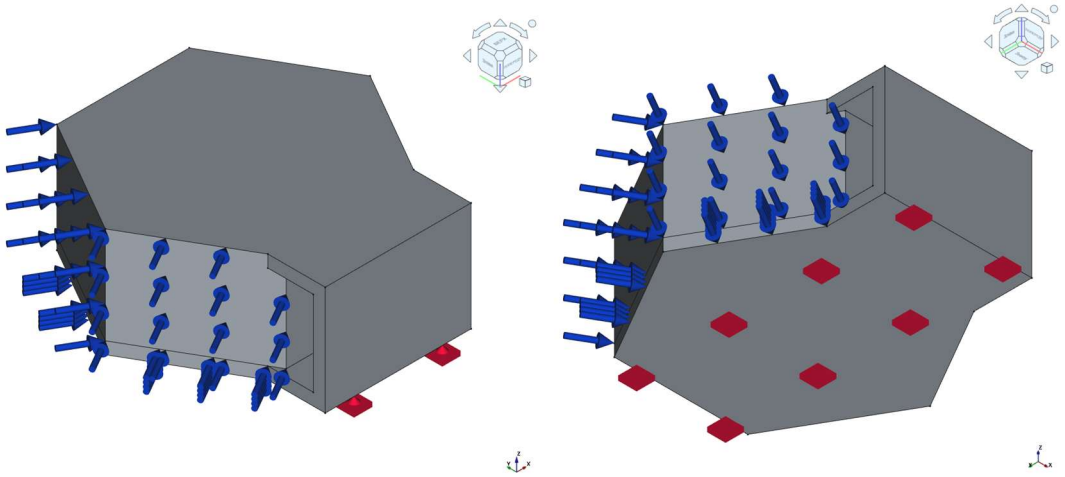
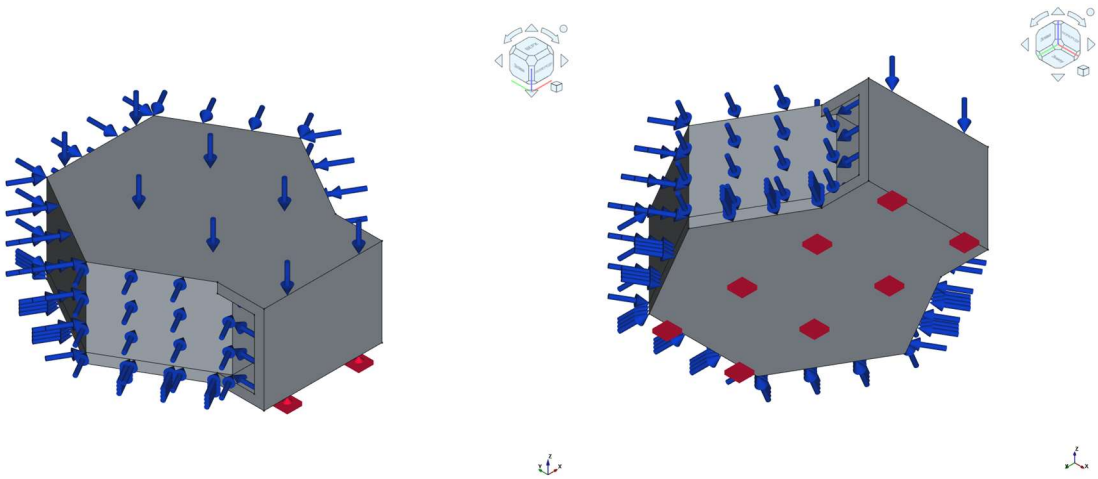


Рисунок 4.2 – Скінчено елементна модель укриття цивільного призначення

Розрахунки виконано для двох розрахункових випадків: для початку взаємодії укриття з ударною хвилею, де на фронтальну стіну діє тиск віддзеркалення, та для занурення укриття в ударну хвилю, де на фронтальну стіну буде діяти тиск обтікання. Споруда додатково знаходиться під дією власної ваги за прискорення вільного падіння $g = 9{,}807$ м/с^2. Закріплення в обидвох випадках проведено у вигляді жорсткого затиснення за нижньою гранню пластини фундаменту.



а)



б)

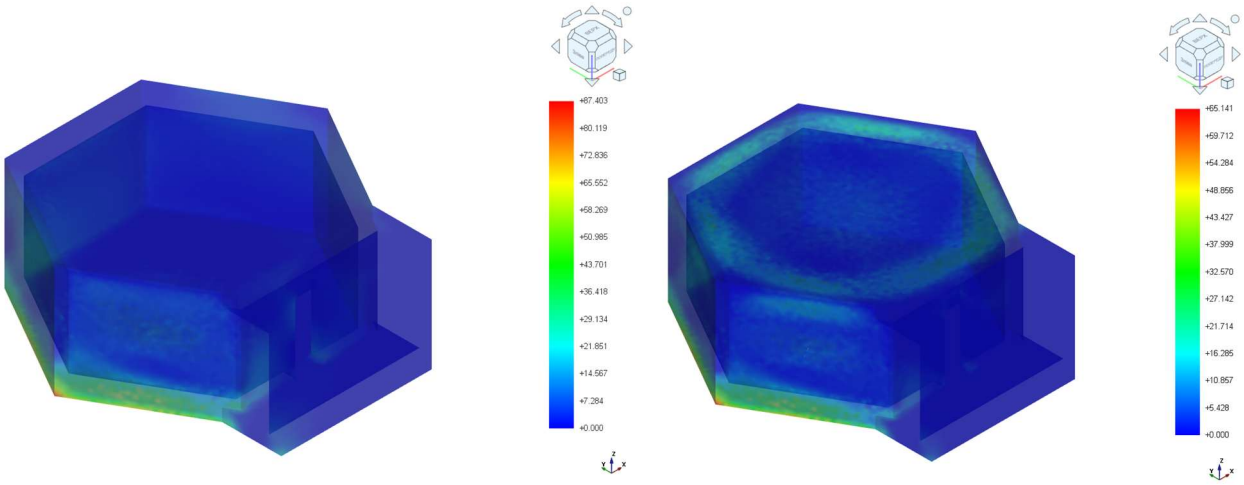
Рисунок 4.3 – Граничні умови прикладені до твердотільної моделі:

а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа);

б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі $\Delta P_f = 0{,}769$ МПа)

4.3 Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності

У модулі Calculix записано файл задачі та виконано розрахунок статичної задачі міцності для обох варіантів дії квазістатичного тиску віддзеркалення $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа на фронтальну стіну та дій квазістатичного тиску обтікання фронтальної стіни $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа та тиску фронту ударної хвилі $\Delta P_f = 0{,}769$ МПа на всі інші стіни та стелю. Достатність висоти перерізу залізобетонного елемента визначено за критерієм міцності Мора (Coulomb Mohr criterion) для визначення напружених станів у бетоні, як у матеріалі що має різні границі міцності на стискання та розтягання. За нормальних умов достатньої товщини перерізу достатня, напруження за Кулоном Мором в стиснутій зоні повинні бути близько нуля.

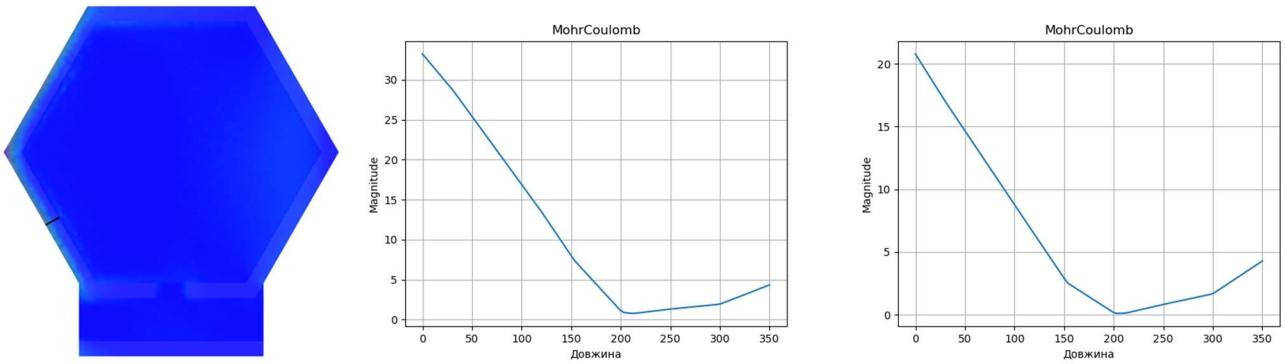


а) б)

Рисунок 4.4 – Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion; V теорія міцності) для визначення напружених станів у бетоні (при товщині стін 0,350 м):

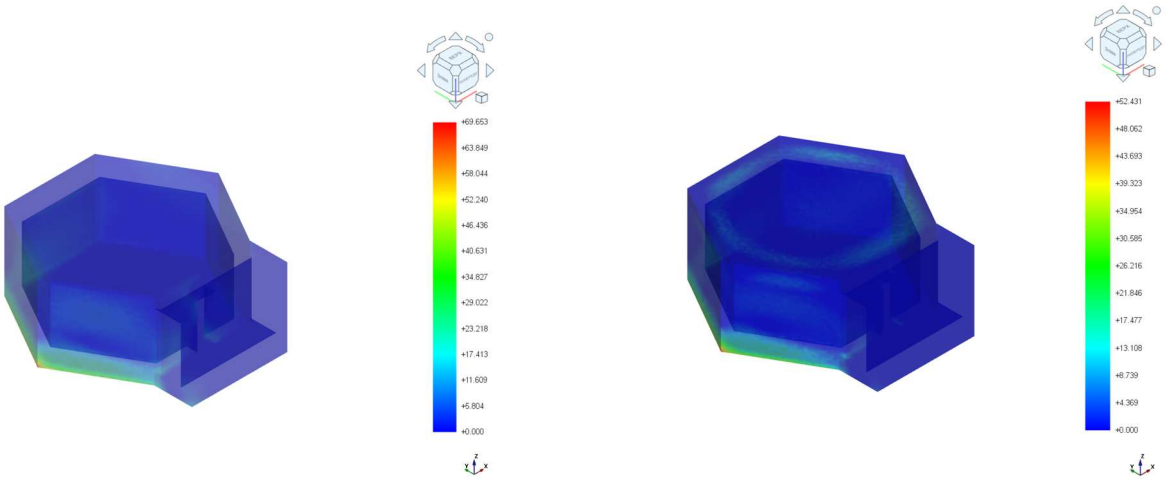
а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа);

б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі $\Delta P_f = 0{,}769$ МПа).



а) б) в)

Рисунок 4.5 – Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion; V теорія міцності) у центрі мас стіни за товщиною у мм (при товщині стін 0,350 м): а) розташування перерізу; б) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔP_V = 3,144 МПа); в) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔP_V = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔP_f = 0,769 МПа).



а) б)

Рисунок 4.6 – Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion; V теорія міцності) для визначення напружених станів у бетоні (при товщині стін 0,500 м):

а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔP_V = 3,144 МПа);

б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔP_V = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔP_f = 0,769 МПа).

а) б)

Рисунок 4.7 – Графік критерію міцності Мора (Coulomb Mohr criterion; V теорія міцності) у центрі мас стіни за товщиною у мм (при товщині стін 0,500 м): а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔP_V = 3,144 МПа); б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔP_V = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔP_f = 0,769 МПа).

Результати аналізу оцінюються за критерієм міцності Мора (Coulomb Mohr) (Рисунки 4.4 та 4.5). Початкові результати показують, що напруження за Мором у стиснутій зоні значно перевищують нуль, що свідчить про недостатню висоту перерізу та його руйнування від стискання.

У параметричній моделі протиуламкової захисної споруди підвищено товщини кожного конструкційного елемента до 0,500 м. Проведено повторний розрахунок статичної задачі міцності для обох варіантів дії квазістатичного тиску (Рисунки 4.6 та 4.7), де у стисненій зоні за Мором близькі до нуля, отже товщина пластинчатих конструктивних елементів достатня. Варіант а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею є більш небезпечним з огляду критерію Мора.

За допомогою інструментів постобробки будуються ізополя необхідних коефіцієнтів армування. Необхідна площа армування на одиницю ширини розраховується шляхом множення глибини зони розтягу/стиску на відповідний коефіцієнт армування з кольорової шкали. Слід зазначити, що ці значення є орієнтовними через розмитість меж ізополів, але є придатними для попередньої проектної оцінки.

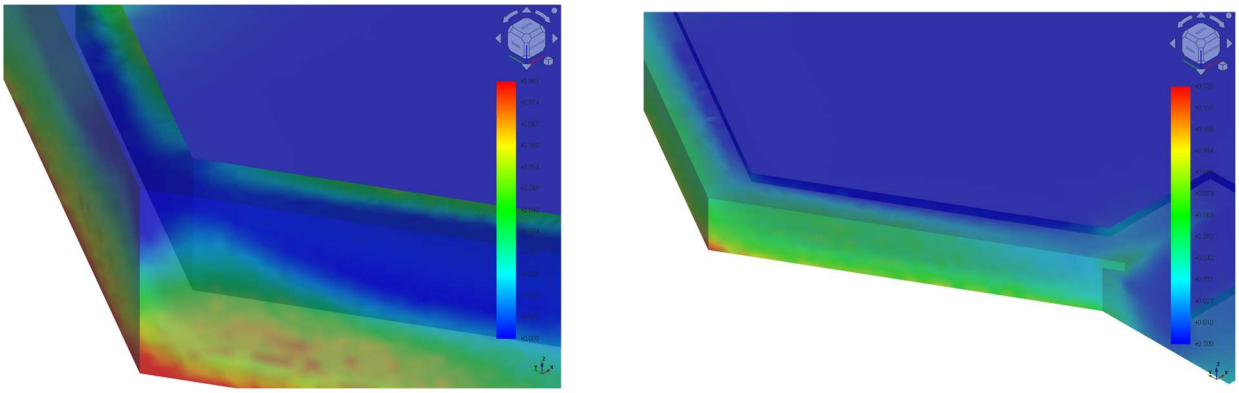


Рисунок 4.8 – Ізополя армування здовж осі Z для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа) у найбільш навантажених перерізах стіни

За даними Рисунку 4.8 визначимо площу армування на метр погонний для стін за умови початку взаємодії укриття з ударною хвилею. Глибина зони армування з внутрішнього боку стіни (внутрішня стиснута грань) становить половину товщини стіни, що становить 25 см, тоді і площа арматури на погонний метр складає $25 \cdot 100 \cdot 0{,}054 = 135\ см^2/м$. Аналогічно глибина зони армування з зовнішнього боку стіни (зовнішня розтягнута грань) становить $25 \cdot 100 \cdot 0{,}072 = 180\ см^2/м$.

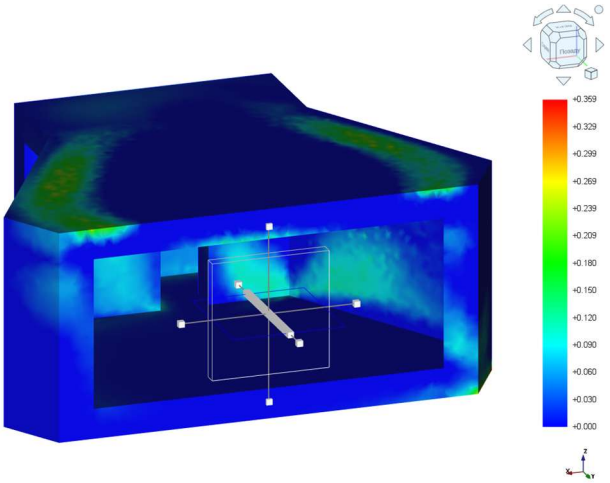


Рисунок 4.8 – Ізополя армування здовж осі X для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну $\Delta P_V = 3{,}144$ МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі $\Delta P_f = 0{,}769$ МПа) у найбільш навантажених перерізах стелі

Аналіз плитного фундаменту виконується за спрощеною методикою на основі інвертованого підходу [52]: замість навантаження від фундаменту на ґрунт, до фундаментної плити прикладається реакція основи ґрунту у вигляді тиску, спрямованого вниз. Стіни ж в свою чергу жорстко затиснені.

Реакції жорстко затисненої нижньої грані фундаменту приведені в Таблиці 4.2. Повна рівнодійна сила реакції основи була попередньо визначена з умови жорсткого защемлення в основному структурному аналізі Fz, Н. Ця сила прикладається як рівномірно розподілене навантаження до нижньої поверхні окремої фундаментної плити, що еквівалентно $\frac{40131540\,H}{31{,}826\,м^2} = 1{,}261\,МПа$. Аналіз визначає характер згину фундаменту та відповідні вимоги до армування, завершуючи цикл попереднього проектування конструкції.

Таблиця 4.2 – Реакції жорстко затисненої нижньої грані фундаменту

№	Випадок навантаження	Fx, Н	Fy, Н	Fz, Н
1	Початок взаємодії укриття з ударною хвилею	-7,589370E+07	3,526190E+05	1,939824E+06
2	Занурення укриття в ударну хвилю	-5,736920E+07	4,641595E+06	4,013154E+07

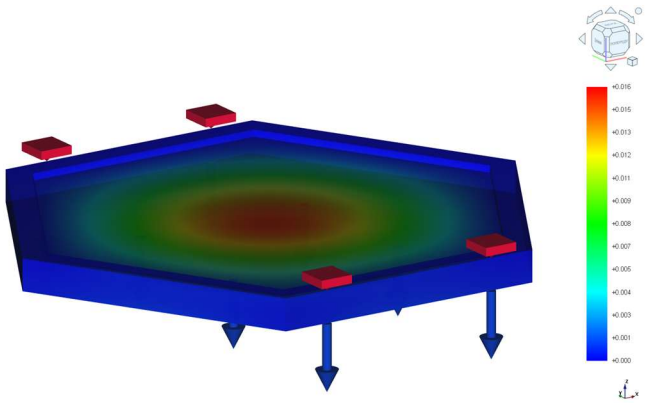


Рисунок 4.9 – Абсолютні лінійні переміщення плити фундаменту, м

4.4 Висновки за четвертим розділом

1. Створено параметричну модель та визначено її обмеження. Було розроблено твердотільну та скінчено-елементну модель укриття в FreeCAD. Вибір цієї платформи обґрунтований її доступністю та потужними інструментами для 3D-моделювання. Водночас, було чітко визначено та враховано суттєві обмеження для даної задачі: розрахунок проводився в лінійній пружній постановці, без прямої інтеграції арматури в скінчено-елементну сітку. Такий підхід є спрощеним, але придатним для попередньої проектної оцінки та виявлення фундаментальних недоліків конструкції.

2. Виявлено недостатню несучу здатність початкового проекту. Ключовим результатом моделювання стало те, що товщина стін та покриття 350 мм, розрахована в попередньому розділі на опір пробиттю уламком [53], є недостатньою для сприйняття квазістатичного навантаження від вибухової хвилі (3,144 МПа). Застосування критерію міцності Мора, що враховує різний опір бетону стиску та розтягу, чітко вказало на руйнування конструкції від надмірних стискаючих напружень.

3. Обґрунтовано та перевірено головне конструктивне рішення. На основі отриманих даних було прийнято та перевірено ключову проектну зміну: збільшення товщини всіх огороджувальних конструкцій (стін, покриття, фундаменту) до 500 мм. Повторний розрахунок моделі з новою товщиною підтвердив, що напруження в бетоні не перевищують допустимих меж, що забезпечує структурну цілісність споруди під дією розрахункового вибухового навантаження.

4. Визначено найбільш небезпечний сценарій та отримано дані для армування. Аналіз двох розрахункових випадків показав, що найбільш небезпечним є сценарій, що імітує початкову фазу взаємодії з вибуховою хвилею (тиск віддзеркалення на фронтальну стіну). Крім того, модель дозволила отримати орієнтовні дані для попереднього розрахунку необхідної площі армування в найбільш навантажених зонах та продемонструвала підхід до аналізу фундаментної плити.

ВИСНОВКИ

Дана кваліфікаційна робота присвячена вирішенню надзвичайно актуальної інженерної задачі – проектуванню протиуламкової захисної споруди, здатної ефективно протистояти сучасним воєнним загрозам, характерним для України. Проведене дослідження підтвердило, що застарілі підходи до цивільного захисту є неадекватними, а масове впровадження нових модульних укриттів вимагає науково-обґрунтованого підходу до їх проектування.

На основі виконаного аналізу та розрахунків було зроблено наступні ключові висновки:

1. Встановлено, що з 2022 року основними загрозами для цивільних об’єктів є не лише прямі влучання, а й ураження уламками ракет, артилерійських снарядів та ударна хвиля. Тому проектування захисних споруд вимагає комплексного підходу, що враховує декілька типів загроз. Початковий розрахунок, заснований лише на одній загрозі – пробитті уламком (масою 10 г, швидкістю 1400 м/с). Показано, що для запобігання відколюванню бетону достатньою є товщина конструкції 178 мм. Прийняте на цьому етапі консервативне проектне рішення з товщиною 356 мм, хоч і відповідало вимогам ДБН, виявилося недостатнім.

2. Проаналізовано вимоги ДБН В.2.2-5:2023 та встановлено, що використання виключно емпіричних формул для розрахунку на пробиття є недостатнім для забезпечення повної безпеки. Доведено, що кращим підходом є поєднання нормативних розрахунків із симуляцією роботи композитної споруди. Ключовим результатом роботи стало виявлення того, що навантаження від вибухової хвилі є визначальним для несучої здатності конструкції.

3. Обґрунтовано та побудовано тривимірну скінчено-елементну модель протиуламкового укриття у програмному середовищі FreeCAD. Створена модель враховує фізико-механічні властивості армованого бетону як композитного матеріалу та дозволяє дослідити поведінку конструкції в умовах, наближених до реальних, із застосуванням спрощеної лінійної постановки задачі для оперативного інженерного аналізу.

4. За результатами числового дослідження напружено-деформованого стану виконано симуляцію впливу вибухового навантаження (еквівалент 150 кг тротилу на відстані 10 м, тиск 3,144 МПа).Скінчено-елементне моделювання чітко продемонструвало, що конструкція товщиною 350 мм не витримує квазістатичного тиску від вибуху. Аналіз за критерієм міцності Мора показав руйнування бетону від надмірних стискаючих напружень. Це доводить, що проектування виключно на опір уламкам є критичною помилкою.

5. Головним практичним результатом роботи є науково-обґрунтоване конструктивне рішення для забезпечення надійності укриття. На основі результатів моделювання було доведено необхідність збільшення товщини всіх огороджувальних конструкцій (стін, покриття та фундаменту) до 500 мм. Повторний аналіз підтвердив, що така товщина забезпечує структурну цілісність споруди під дією розрахункового вибухового навантаження, утримуючи напруження в допустимих межах.

6. Запропоновано та обґрунтовано ефективні архітектурно-планувальні рішення. Для підвищення загального рівня захисту було запропоновано використання вхідного тамбура-лабіринту для запобігання прямому зальоту уламків та шестикутної форми споруди в плані, яка завдяки кращим аеродинамічним характеристикам, дозволяє знизити пікове навантаження від вибухової хвилі порівняно з традиційною прямокутною формою.

7. Продемонстровано ефективність застосування доступних інженерних інструментів для вирішення складних задач. Робота показала, що навіть безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, як-от FreeCAD, може бути потужним інструментом для попереднього структурного аналізу. Незважаючи на спрощення (лінійна постановка задачі), модель дозволила виявити фундаментальний недолік початкового проекту та обґрунтувати ключові конструктивні зміни.

Таким чином, у ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи було пройдено повний цикл інженерного проектування: від аналізу загроз та розрахунку за емпіричними формулами до створення та верифікації скінчено-елементної моделі, що дозволило розробити науково-обґрунтований та надійний проект протиуламкової захисної споруди.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Goncharova, Y. Fursa, O. Kryzhevska, L. Zolota, and I.P. Hrybachova, “Inheritance in the occupied territories and in the area of antiterrorism operation: the experience of Ukraine,” Amazonia Investiga, vol. 11, no. 50, pp. 55–65, 2022. doi: https://doi.org/10.34069/AI/2022.50.02.6

2. Andrew Monaghan, “The ‘War’ in Russia’s ‘Hybrid Warfare’,” Parameters, vol. 45, no. 4, 2015. doi: https://doi.org/10.55540/0031-1723.2987

3. O. Shevchuk, N. Mentuh, “Legal aspects of professional preparation of anti-terrorist operation,” Actual problems of law, no. 3, pp. 96–99, 2018. doi: https://doi.org/10.35774/app2017.03.096

4. A. Loishyn, I. Tkach, M. Tkach, and V. Shevchuk, “Analysis and systematization of approaches to understanding the concept of “hybrid war”,” Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”, 11(1), pp. 145–162, 2021. doi: https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.1.15

5. M. Kyzym, V. Khaustova, and V. Shlykova, “War in Ukraine: Analysis of the Prerequisites, Lessons of the Infighting, and Conclusions for the Future,” The Problems of Economy, no. 2(52), pp. 47–57, 2022. doi: https://doi.org/10.32983/2222-0712-2022-2-47-57

6. L.A. Moniz Bandeira, “Ukrainian Separatists and the War in Donbass,” in The World Disorder. Springer, Cham, 2019. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-03204-3_20

7. M. Zabrodskyi, J. Watling, O.V. Danylyuk, and N. Reynolds, Preliminary lessons in conventional warfighting from Russia’s invasion of Ukraine: February-July 2022. London: Royal United Services Institute, 2022. Available: https://static.rusi.org/359-SR-Ukraine-Preliminary-Lessons-Feb-July-2022-web-final.pdf

8. Y. Elster, A. Zussman, and N. Zussman, “Effective Counter-Terrorism: Rockets, Iron Dome, and the Israeli Housing Market,” Journal of Policy Analysis and Management, 38(2), pp. 308–337, 2019. doi: https://doi.org/10.1002/pam.22114

9. L. Zucker, E.H. Kaplan, “Mass casualty potential of Qassam rockets,” Studies in Conflict & Terrorism, 37(3), pp. 258–266, 2014. doi: https://doi.org/10.1080/1057610X.2014.872024

10. V. Yakovenko, B. Volochiy, N. Furmanova, I. Savina, and O. Malyi, “Application of states and transitions graph for developing the model of the process of shelling a mobile armored target,” Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, pp. 727–732. doi: https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766916

11. V. Yakovenko et al., “Determining the components of the structuralautomatic model of firing a single target in armor protection with fragmentation-beam projectiles of directed action in a series of three shots based on the reference graph of states,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 5, no. 3(119), pp. 29–41, 2022. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266275

12. V. Yakovenko, et al., “Building a model of the process of shooting a mobile armored target with directed fragmentation-beam shells in the form of a discrete-continuous stochastic system,” Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6, no. 4(114), pp. 51–63, 2021. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245703

13. Yakovenko, Vadim & Furmanova, Nataliia & Flys, Ihor & Malyi, Oleksandr & Farafonov, Oleksii & Moroz, Harri. (2024). Determination of the generalized optimality criteria for selecting civilian shelter facilities from attacks by ballistic (cruise) missiles and kamikaze drones in urbanized areas. System research and information technologies. 25-43. 10.20535/SRIT.2308-8893.2024.3.02.

14. M. Graswald, R. Gutser, J. Breiner, F. Grabner, T. Lehmann, and A. Oelerich, “Defeating Modern Armor and Protection Systems,” Proceedings of the 2019 15th Hypervelocity Impact Symposium, Destin, FL, USA. April 14–19, 2019. V001T03A004. ASME. doi: https://doi.org/10.1115/HVIS2019-050

15. M.S. Ismail, A. Ahmad, S. Ismail, and N.M.M. Yusop, “A review on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) threats assessments,” in AIP Conference Proceedings, vol. 2617, no. 1, 2022. doi: https://doi.org/10.1063/5.0119703

16. J.P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, and A. Chehab, “Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations,” Internet of Things, 11, 100218, 2020. doi: https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218

17. A. Shakibamanesh, “Public shelters: Towards secure urban planning and designing in terms of passive defense,” Geografia, 11(3), 2015. Available: http://journalarticle.ukm.my/9219/1/1x.geografia-mac15-amir-bi-edam.pdf

18. W. Harmata, Z. Szcześniak, M. Sobiech, and A. Baryłka, “Ad hoc hiding places as part of collective protection,” Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych, (2), pp. 26–41, 2023. doi: https://doi.org/10.37105/iboa.173

19. G. Cohen-Lazry, T. Oron-Gilad, “Is staying out of bomb-shelters a humanautomation interaction issue?,” Technology in Society, 47, pp. 25–30, 2016. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.techsoc.2016.08.002

20. H. Medema, H. Blackman, K. Savchenko, and R. Boring, “Human reliability considerations from the Hawaii ballistic missile alert event,” Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14, September 2018, Los Angeles, CA. Available: https://scholarworks.boisestate.edu/research_development_pubs/8/

21. Alan J. Vick, Sean M. Zeigler, Julia Brackup, and John Speed Meyers, “Air Base Defense. Rethinking Army and Air Force Roles and Functions,” RAND, 2020. Available: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4368.html

22. J. Drozd, “Experiment of the tactical decision support system within company defensive operation,” in Modelling and Simulation for Autonomous Systems: 5th International Conference, MESAS 2018, Prague, Czech Republic, October 17–19, 2018, Revised Selected papers 5, pp. 544–552. Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14984-0_40

23. M. Pydko, “Aktualnist tsyvilnoho zakhystu naselennia zhytlovoi zabudovy v mistakh Ukrainy,” Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia, 83, pp. 254–265, 2023. doi: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.83.254-265

24. Mendes N, Lourenço PB. Sensitivity analysis of the seismic performance of existing masonry buildings. Eng Struct 2014;80:137–46. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.005.

25. BBC. “History of deadly earthquakes”, BBC News online, 19th August 2018. accessed 3rd July 2020,, https://www.bbc.com/news/world-12717980; 2018.

26. CEN, 2004, EN 1998, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance”, European Commission, CEN – European Committee for Standardization, 2004.

27. Gomes Ferreira, Joao & Moura, Rita & Ferreira, Ana Margarida & Milne, Vasco & Gonçalves, Eduardo & Abreu, Diamantino & Guerreiro, Luís. (2023). SHELTER Project: Designing an innovative solution for earthquake resilience and survival. 10.54941/ahfe1003534.

28. Grunwald et al., 2018, “Reliability of collapse simulation – Comparing finite and applied element method at different levels”, Christoph Grunwald, Ahmed A. Khalil, Benjamin Schaufelberger, Erik Maria Ricciardi, Cosimo Pellecchia, Emiliano De Iuliis, Werner Riedel, Engineering Structures, Vol. 176, pp. 265-278, Elsevier, September 2018.

29. Khalil et al., 2020, “High Fidelity Numerical Seismic Modeling of Ancient Brick Structures”, Ahmed Khalil, Cosimo Pellecchia, Emiliano De Iuliis, ASCE Structures Congress 2020, April 5–8, 2020, St. Louis, Missouri, USA. (conference cancelled, Proceedings available at ASCE site).

30. Schleicher, 1926, “Zur theorie der Baugrundes”, F. Schleicher, Der Bauingenieur, 7, 931-935 and 949-952, 1926.

31. Lee J, Lopez M. (2014) An Experimental Study on Fracture Energy of Plain Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials 2014;8(2): 129–39. https://doi.org/10.1007/s40069-014-0068-1.

32. Scotta R, Vitaliani R, Saetta A, Onate ˜ E, Hanganu A. (2001) A scalar damage model with a shear retention factor for the analysis of reinforced concrete structures: theory and validation. Comput Struct 2001;79:737–55. https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00178-4.

33. CEN, 2002, EN 1991, “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings”, European Commission, CEN – European Committee for Standardization, 2004.

34. Ivancic P. Hybrid cadaveric/surrogate model of thoracolumbar spine injury due to simulated fall from height. Accid Anal Prev 2013;59:185–91. https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.024.

35. Ivancic P. Biomechanics of thoracolumbar burst and chance-type fractures during fall from height. Global Spine Journal 2014;4:161–8. https://doi.org/10.1055/s-0034-1381729.

36. Zhang Y, Ho SMY. Risk Factors of Posttraumatic Stress Disorder among Survivors after the 512 Wenchuan Earthquake in China. PLoS ONE 2011;6(7):e22371. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022371.

37. Arthur Brutter + Ido Bruno: earthquake proof table, 2025, https://www.designboom.com/readers/arthur-brutter-ido-bruno-earthquake-proof-table/

38. LifeGuard Structures, 2025, https://www.lifeguardstructures.com, accessed in 20 November 2025.

39. eQuakeSafe Shelter Box, 2025, https://www.facebook.com/EQuakeSafe/, accessed in 20 November 2025.

40. Atlas Survival Shelters, 2025, https://atlassurvivalshelters.com/precast-concrete-shelters/, accessed in 20 November 2025.

41. Chumdan Bunker System, 2025, https://chumdansystem.com/?ckattempt=2, accessed in 20 November 2025.

42. ДБН 2.2-5:2023 : Захисні споруди цивільного захисту [Чинний від 2023-11-01]. 2023, Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. – 120 с.

43. Kotsiuruba, Volodymyr & Datsenko, Ivan & Dachkovsky, Volodymyr & Cherevko, Ruslan & Polyulyak, Vasyl & Ivashchuk, Oleksandr & Furman, Ihor. (2020). Influence of air shock wave on shelter. Strength of Materials and Theory of Structures. 133-144. 10.32347/2410-2547.2020.105.133-144.

44. ДБН В.2.6.-98:2009 : Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Чинний від 2009-12-24]. - К.: Укрархбудінформ, 2009. – 71 с.

45. Fang, Q. & Hao, Wu. (2017). Concrete structures under projectile impact. 10.1007/978-981-10-3620-0.

46. Owen-Smith M.S. High velocity missile wounds. Baltimore 1991.

47. Барбашин В.В., Назаров О.О., Рютин В.В., Толкунов І.О. Основи організації піротехнічних робіт. Навчальний посібник / Під ред. В.П. Садкового. – Харків: ВРВД УЦЗУ, 2010. – 353 с., ілюстр.

48. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинні від 2007-01-01]. – К. : Мінбуд України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2006. – 75 с. – (Державні будівельні норми)

49. FreeCAD Documentation 2025, https://wiki.freecad.org/Main_Page, accessed in 20 November 2025.

50. ДСТУ Б В.2.7-176:2008. Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови (EN 206-1:2000, NEQ) [Текст]. – Чинний від 2009-09-30. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 109 с.

51. ДСТУ 3760:2019 Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. – К.: Держстандарт України, 2019.

52. Збірник наукових розробок планувальних та конструктивних рішень споруд цивільного захисту: монографія / Антон ГАСЕНКО, Оксана ДОВЖЕНКО, Володимир ПОГРІБНИЙ, Олександр СЕМКО, Олена ФІЛОНЕНКО, Олег ЮРІН; за ред. Олени ФІЛОНЕНКО. – Полтава: ПП «Астрая», 2023. – 209 с.

53. Tsyhanenko, L. A., Zhyhylii, D. O. Assessment of the Ballistic Limit Velocity for Concrete Open Anti-Fragmentation Shelters Using Empirical Models. // The 10th International scientific and practical conference “Global trends in science and education” (October 20-22, 2025) SPC “Sci-conf.com.ua". – Kyiv, Ukraine. 2025. 774 p. (P. 243 – 247).

ДОДАТОК А

Тези доповіді на конференції

UDC 001.1

The 10th International scientific and practical conference "Global trends in science and education" (October 20-22, 2025) SPC "Sci-conf.com.ua", Kyiv, Ukraine. 2025. 774 p.

ISBN 978-966-8219-82-5

The recommended citation for this publication is:
Ivanov I. Analysis of the phaunistic composition of Ukraine // Global trends in science and education. Proceedings of the 10th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua". Kyiv, Ukraine. 2025. Pp. 21-27. URL: https://sci-conf.com.ua/x-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-global-trends-in-science-and-education-20-22-10-2025-kiyiv-ukrayina-arhiv/.

Editor
Komarytskyy M.L.
Ph.D. in Economics, Associate Professor

Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe, Ukraine and from neighbouring countries and beyond. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science. The collection of scientific articles is for students, postgraduate students, doctoral candidates, teachers, researchers, practitioners and people interested in the trends of modern science development.

e-mail: kyiv@sci-conf.com.ua

homepage: *https://sci-conf.com.ua*

©2025 Scientific Publishing Center "Sci-conf.com.ua" ®
©2025 Authors of the articles

49. ***Стрижак К. А., Качмар Н. І.*** 227
ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ШІ У ВЕБ-РОЗРОБЦІ: ІНТЕГРАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ШІ У ФРОНТЕНД І БЕКЕНД

50. ***Тімошин А. С., Бешлей А. В., Білодід Р. О., Ганусак Б. В.*** 232
ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ (VR) ДЛЯ ТРЕНУВАННЯ ТАКТИЧНИХ ДІЙ ПРАВООХОРОНЦІВ

51. ***Циганенко Л. А., Вітвицька Л. А.*** 239
ПИТАННЯ КОРОЗІЇ БЕТОНУ КОНСТРУКЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

52. ***Циганенко Л. А., Жигилій Д. О.*** 243
ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ БАЛІСТИЧНОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ БЕТОННИХ ВІДКРИТИХ ПРОТИУЛАМКОВИХ УКРИТТІВ ЗА ЕМПІРИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ

53. ***Циганенко Г. М., Рудіченко О. І.*** 248
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ І МОДЕРНІЗАЦІЇ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ УКРАЇНИ

54. ***Чикильов А. В.*** 252
МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ OSINT ДЛЯ АНАЛІЗУ ВИТОКІВ ПЕРСОНАЛЬНИХ ТА КОРПОРАТИВНИХ ДАНИХ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

55. ***Голуб А. М., Репецька Д. О.*** 256
ЗАСТОСУВАННЯ ПОКАЗНИКОВИХ І ЛОГАРИФМІЧНИХ ФУНКЦІЙ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ

56. ***Калайда О. Ф.*** 262
ТРОЇСТИЙ ІТЕРАТИВНИЙ ПРОЦЕС ДЛЯ СКАЛЯРНИХ СКІНЧЕННИХ РІВНЯНЬ

GEOGRAPHICAL SCIENCES

57. ***Косенчук О. Л.*** 264
ДО ПИТАННЯ ГЕОГРАФІЧНИХ ПЕРСПЕКТИВ ТА ПЕРЕСТОРОГ УКРАЇНИ ЩОДО МІЖДЕРЖАВНИХ ОБ'ЄДНАНЬ ВИКЛАДЕНИХ ВИДАТНИМ НАЦІОНАЛЬНИМ ПОЛІТИКОМ ТА ПУБЛІЦИСТОМ СТЕПАНОМ БАНДЕРОЮ В ЙОГО ФУНДАМЕНТАЛЬНІЙ ПРАЦІ: ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНСЬКОЇ РЕВОЛЮЦІЇ

58. ***Луценко Д. В., Бібікова П. К., Остаченко Л. В.*** 269
СТАЛИЙ РОЗВИТОК ЯК ГЛОБАЛЬНИЙ ТРЕНД СУЧАСНОЇ ГЕОГРАФІЧНОЇ НАУКИ

GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES

59. ***Дубей Н. В.*** 275
ХАРАКТЕРИСТИКА МІНЕРАЛЬНИХ ВОД ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ ПРОВІНЦІЇ СКЛАДЧАСТОЇ ОБЛАСТІ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

CERTIFICATE
is awarded to
Zhyhylii Dmytro
for being an active participant in
X International Scientific and Practical Conference
"GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION"
24 Hours of Participation
(0,8 ECTS credits)
KYIV
20-22 October 2025
INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
GLOBAL TRENDS IN SCIENCE AND EDUCATION
SCI-CONF.COM.UA
• KYIV •
• 20-22 OCTOBER 2025 •
sci-conf.com.ua

ОЦІНКА ГРАНИЧНОЇ БАЛІСТИЧНОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ БЕТОННИХ ВІДКРИТИХ ПРОТИУЛАМКОВИХ УКРИТТІВ ЗА ЕМПІРИЧНИМИ МОДЕЛЯМИ

Циганенко Людмила Анатоліївна,

к.т.н., доцент

Жигилій Дмитро Олексійович,

Магістр ОПП Будівництво та цивільна інженерія

Національний Аграрний Університет

м. Суми, Україна

tsyganenkoLA@ukr.net

Вступ./Introductions.

Повномасштабна війна в Україні супроводжується інтенсивними артилерійськими та ракетними обстрілами, що створює постійну загрозу для цивільного населення. В таких умовах питання надійності захисних споруд, зокрема протиуламкових укриттів, набуває особливої актуальності [1]. Бетонні укриття залишаються одним із найпоширеніших типів конструкцій, здатних забезпечити ефективний захист від уламків снарядів та вибухових хвиль. Оцінювання граничної балістичної швидкості уламків, за якої можливе пробиття бетонної перешкоди, є ключовим для визначення оптимальної товщини огороджувальних елементів укриття. Такі дослідження дають змогу проєктувати конструкції, що гарантують збереження життя людей навіть у разі потужних обстрілів.

Отже, дослідження взаємодії уламків із бетонними протиуламковими укриттями має теоретичне та практичне значення, що сприяє підвищенню ефективності захисту цивільного населення під час воєнних дій. У цій роботі проведено аналіз граничної

балістичної швидкості V_{BL} для уламка снаряда при дії на типове протиуламкове укриття, розташоване в м. Суми, Україна.

Мета роботи./Aim. Метою даної роботи є **оцінка граничної балістичної швидкості уламків снаряда при дії на бетонні відкриті протиуламкові укриття** із використанням відомих емпіричних моделей, а також **визначення адекватності різних методик** для оцінювання захисної здатності конструкцій із важкого бетону класу С20/25.

Матеріали та методи./Materials and methods. Для оцінки проникання снарядів у бетонні захисні споруди використано аналітичний метод дослідження із застосуванням емпіричних моделей [2,3,5], що зведені в таблицю 1.

Порівняння результатів здійснювалося за такими параметрами: глибина проникання - hpen, гранична товщина для запобігання пробиттю - hper та гранична балістична швидкість - VBL. Для оцінки адекватності моделей розглянуто їх фізичну доцільність і відповідність типовим умовам дії уламків на бетонні елементи захисних споруд.

Результати та обговорення./Results and discussion.

При ударній взаємодії недеформівного снаряда з бетонною перешкодою спостерігають три послідовні стадії руйнування, що залежать від початкової швидкості удару V_0, як показано на рисунку 1:

- Проникання (Penetration): Снаряд заглиблюється в мішень на певну глибину. Внаслідок витискання матеріалу поблизу місця удару відбувається відколювання бетону з лицьової сторони. При цьому тильна сторона мішені залишається неушкодженою.
- Тилове відколювання (Scabbing): Снаряд проникає в мішень, і на її тильній стороні відбувається відкіл уламків. Цей ефект є критичним для безпеки людей та обладнання, що перебувають за перешкодою.

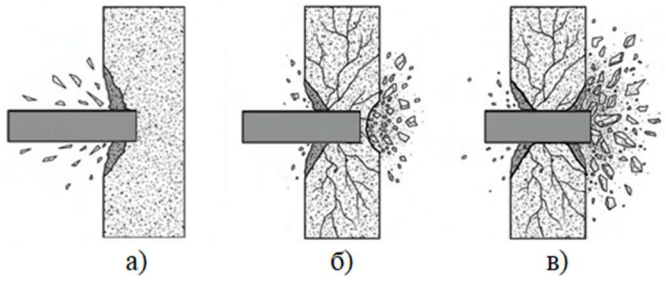


Рисунок 1 – Вплив снаряду на бетонну ціль: а) проникнення;
б) розтріскування та в) пробиття.

- Пробиття (Perforation): Снаряд проходить крізь мішень із певною залишковою швидкістю, утворюючи попереду себе пробку з уламків бетону внаслідок зрізного руйнування.

Для товстостінних бетонних перешкод процес пробиття включає утворення ударного кратера, тунелювання та тилове зрізне пробивання. Для тонких перешкод етап тунелювання, відповідно, відсутній.

Ключовими балістичними параметрами є:

глибина проникання - h_{pen};

гранична товщина для запобігання тиловому відколюванню h_{scab} – мінімальна товщина перешкоди, що запобігає відколу уламків з тильної сторони;

гранична товщина для запобігання пробиттю - h_{per};

гранична балістична швидкість V_{BL} – мінімальна початкова швидкість снаряда, необхідна для пробиття мішені заданої товщини;

залишкова швидкість снаряда V_r .

Розрахунки виконано з використанням відомих емпіричних моделей за умови, що залишкова швидкість уламка дорівнює нулю.

Вхідними даними для розрахунку є:

– Уражаючий елемент: уламок снаряда з тупою носовою частиною;

– Маса уламка: 0,01 кг;

– Діаметр уламка d= 0,015 м;

– Матеріал перешкоди: важкий бетон класу С20/25 з розрахунковим опором стиску f_c = 17 МПа [4];

– Товщина перешкоди h=0,200 м (прийнята як гранична товщина для запобігання тиловому відколюванню, $h = h_{scab}$, що відповідає конструкціям укриттів у м. Суми.

Результати розрахунків за різними емпіричними моделями зведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз балістичних параметрів за емпіричними моделями

№	Емпірична модель	Глибина проникання, h_{pen}, м	Товщина для запобігання пробиттю h_{per}, м	Гранична балістична швидкість, V_{BL}, м/с
1	Модифікована формула Petry (Petry 1910; Samuely 1939)	0,0909	0,1819	10340,0
2	Формула Лабораторії балістичних досліджень (Beth 1941; Chelapati et al. 1972; Gwaltney 1968; Adeli and Amin 1985)	0,1000	0,1300	1459,5
3	Модифікована формула Національного комітету з досліджень оборони (NDRC 1946; Kennedy 1966)	0,1237	0,1732	1644,0
4	Формула Bechtel (BPC 1974; Rotz 1976; Sliter 1980; Bangash 1993)	-	-	3320,0
5	Формула Haldar–Hamieh Formula (Haldar and Hamieh 1984)	0,1237	-	1164,0
6	Формула IRS (Bangash 1993)	1,41	-	-

Висновки./Conclusions. Аналіз результатів показує, що низка моделей є непридатними для даної задачі:

– Моделі Petry та IRS дають нереалістичні результати, що не відповідають фізичній суті процесу проникання уламка (значення глибини проникання та швидкості).

– Моделі Bechtel та IRS враховують лише міцнісні характеристики бетону, що робить їх малоінформативними.

– Було відкинуто низку інших моделей через обмеження щодо швидкості або маси уламка, зокрема: Whiffen (маса снаряда > 0,136 кг), CEA-EDF (V > 200 м/с), UKAEA (V > 300 м/с), Stone and Webster (V > 157 м/с), Degen та Chang (V > 311,8 м/с), Adeli-Amin (V > 342,9 м/с).

Найбільш релевантними є моделі NDRC та Haldar–Hamieh. Обидві моделі дають однакову розрахункову глибину проникання h_{pen} = 0,1237 м, але різні значення граничної швидкості. Для забезпечення консервативної (із запасом надійності) оцінки слід обрати менше зі значень V_{BL}.

Таким чином, розрахункова гранична балістична швидкість для заданих умов становить: $V_{BL} \approx 1164$ м/с. Це свідчить, що бетонне укриття товщиною 0,20 м здатне ефективно зупиняти уламки із зазначеними характеристиками снарядів зі швидкістю, меншою за цю межу і що уламок не зможе пробити захисне укриття, якщо його швидкість буде нижчою за це значення.

Отримані результати мають практичну цінність для проєктування цивільних укриттів у прифронтових регіонах України, оскільки дозволяють обґрунтовано визначати параметри бетонних конструкцій, необхідних для надійного захисту населення від уламкової дії боєприпасів.

Список літератури

1. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту.
2. Yu, Q.; Zhong, S.; Ge, C. Study on Damage Effect of Fragment Penetrating Concrete. Transactions of Beijing Institute of Technology, 43(3), 259-266 (2023). DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.076.
3. Shi, C.; Fan, X.; Zou, S.; Li, M. Research Progress in High Velocity Penetration into Concrete Theory. Applied Mechanics and Materials, 405-408, 2487-2491 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.2487.
4. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Зі Зміною № 1
5. Qin Fang, Hao Wu. Concrete Structures Under Projectile Impact. Springer Singapore. DOIhttps://doi.org/10.1007/978-981-10-3620-0

ДОДАТОК Б Мультимедійна презентація

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра будівельних конструкцій

Сумський національний аграрний університет

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим рівнем вищої освіти на тему:
«Проектування захисного укриття цивільного призначення»

Здобувач	Жигилій Д.О.
Група	ЗПЦБ 2401 м
Науковий керівник	Циганенко Л.А.

Факультет будівництва та транспорту

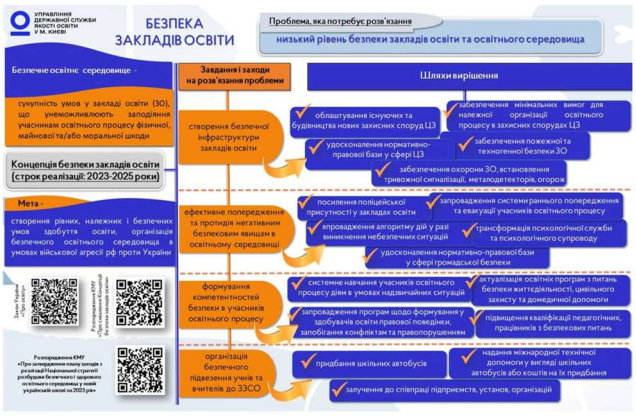
Суми – 2025 р.

Мета дослідження. Виходячи з актуальності й ступеня наукової розробки проблеми, метою дослідження є застосування науково-обгрунтованого інженерного підходу до проектування протиуламкових укриттів, на основі симуляції композитної споруди з армованого бетону під дією уражуючих факторів вибухів різного генезу в умовах російсько-української війни 2022 року.

Завдання дослідження.

- Проаналізувати характерні засоби ураження та типи пошкоджень цивільних об’єктів в Україні з 2022 року.
- Вивчити існуючу нормативну базу та сучасні підходи до проектування захисних споруд. Дослідити нормативну базу і визначити кращі підходи до проектування протиуламкових укриттів, на основі симуляції композитної споруди з армованого бетону під дією уражуючих факторів вибухів.
- Обгрунтувати і побудувати симуляційну скінчено елементу модель нової конструкції протиуламкового укриття, на основі симуляції роботи такої композитної споруди з використанням програмного комплекса FreeCAD.
- Виконати числове дослідження напружено-деформованого стану несучих елементів споруди під вибухового навантаження.
- Запропонувати конструктивні рішення, спрямовані на підвищення захисних властивостей споруди.

Колапс протоколів безпеки та забудованого середовища



Закрите під час тривоги укриття у місті

3

Міжнародні прецеденти в проектуванні захисту: ізраїльська модель

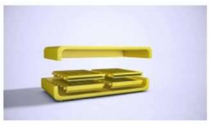
- Захищені житлові ядра (Мамади) є залізобетонним блоками, інтегрованими в структурний план приватних резиденцій.
- Розгортувані фортифікаційні системи, що складаються з модульних, розкладних балістичних бар'єрів.
- Зміцнення критичної інфраструктури передбачає структурну модернізацію (ретрофітинг) соціально значущих об'єктів
- Модульні дзвоноподібні фортифікації є тимчасовими збірними бетонними блоками, що розраховані на обмежену кількість людей
- Використання підземних комунікацій через адаптацію залізобетонних каналізаційних та дренажних труб великого діаметра як імпровізованих лінійних сховищ.

4

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Сейсмостійкий стіл, розроблений Артуром Бруттером

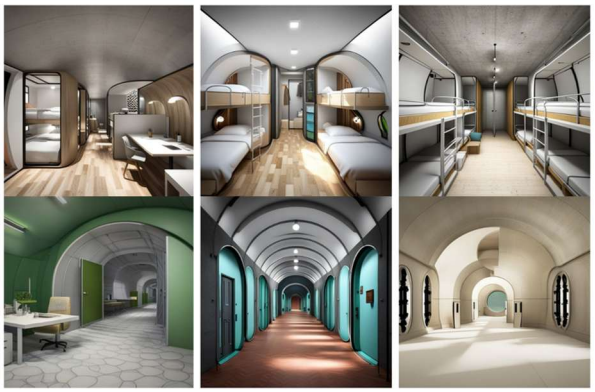
Сейсмостійкі меблі LifeGuard Structures



eQuakeSafe Shelter Box – важко армований елемент, який може слугувати столом

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Бункери заднього двору від Atlas Survival Shelters



Бункери від Chumdan Bunker System

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Мобільні укриття від ініціативи SafePlace.com.ua

7

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

ARCA-NOVA на 7 осіб:

- Зовнішні габарити (з тамбурами): 3,20 х 2,40 х 3,20 м.
- Внутрішні розміри (корисна площа): 2,50 х 1,70 х 2,50 м.
- Корисна площа: 4,25 м^2.
- Товщина стін та стелі: 350 мм.
- Вага: 33 т.

ARCA-NOVA 6.0 на 17 осіб:

- Зовнішні габарити (з тамбурами): 6,70 х 4,00 х 3,50 м.
- Внутрішні розміри (корисна площа): 6,00 х 1,70 х 2,50 м.
- Корисна площа: 10,2 м^2.
- Товщина стін: 350 мм.
- Товщина стелі: від 350 мм.
- Вага: 97 т.

ARCA-NOVA на 27 осіб:

- Зовнішні габарити: ширина від 3,2 м, довжина – від 2,4 м до 10+ м (залежно від кількості людей), висота – 3,2 м.
- Внутрішні розміри: ширина від 2,5 м, довжина – від 1,7 м до 10+ м, висота – 2,5 м.
- Товщина стін та стелі: від 350 мм.

Укриття «Sota Compact Nova 2» на 8 осіб:

- Ширина: 1400 мм (1,4 м).
- Довжина: 2962 мм (2,96 м).
- Висота: 2332 мм (2,33 м).
- Корисна площа: 4,15 м^2.
- Матеріали: Каркас з профільної труби товщиною 6 мм, стіни заповнені армованим бетоном товщиною від 60 мм.

8

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Мобільні укриття від ініціативи ARCA-NOVA

9

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Мобільні укриття від ініціативи
Товариства Червоного Хреста України

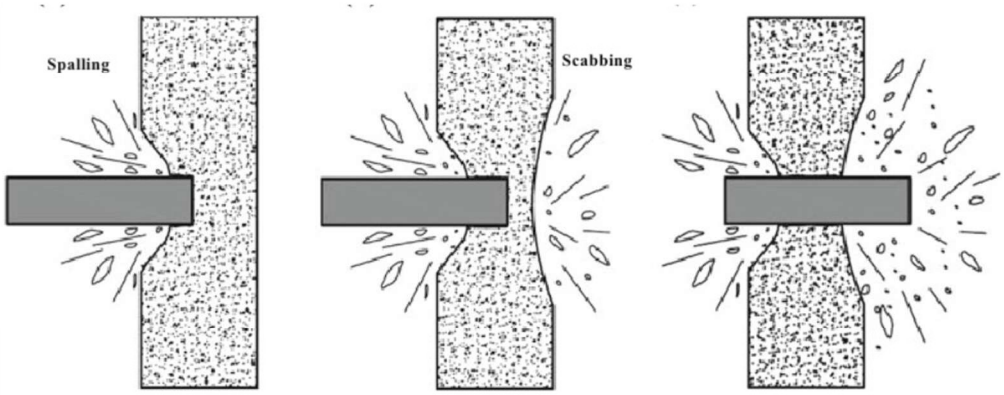
10

Критичний огляд існуючих технічних рішень у галузі захисту від імпульсних навантажень

Мобільні укриття від інших ініціатив

11

Товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом



Вплив снаряда на бетонну ціль:

проникнення; розтріскування та пробиття (зліва направо).

12

Товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом

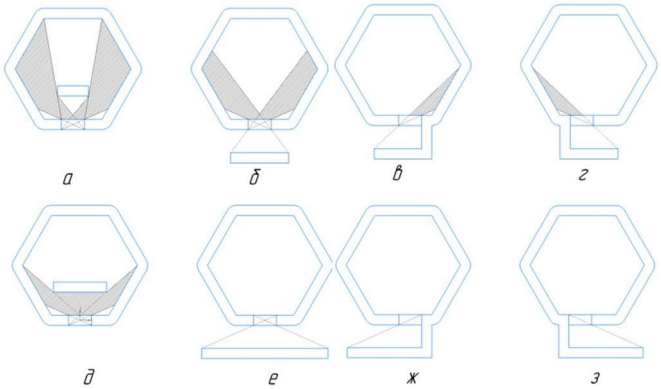
Вхідними параметрами є маса снаряда (M = 10 г), швидкість (V0 = 1400 м/с) – це відповідає кінетичній енергії 10 кДж , калібр середній (d = 15 мм), розрахункове значення міцності бетону важкого С25/30 на стиск (fcd = 17 МПа) та коефіцієнт для тупо-загостреної форми носової частини (N* = 1,0).

В аналізі застосовуються емпіричні формули Комітету з досліджень національної оборони (NDRC).

Приймаємо розрахункові товщини: глибину проникнення 107 мм, товщину пробиття 153 мм і товщину розтріскування 178 мм. Для забезпечення структурної цілісності при багаторазових влучаннях приймається консервативна проектувальна товщина 356 мм, що відповідає подвійній товщині розтріскування і є допустимою за ДБН В.2.2-5:2023. Зазначимо, що у малих відкритих (незаглиблених) спорудах цивільного захисту міста Суми проектувальна товщина склала 200 мм, що відповідає запасу за граничною дією усього на всього у 1,12 рази.

13

Товщина огороджувальних конструкцій для опору безпосередньому пробиттю снарядом



Варіанти укриття при плануванні тамбура короткого та мінімально довгого за умовою лінійного неураження:

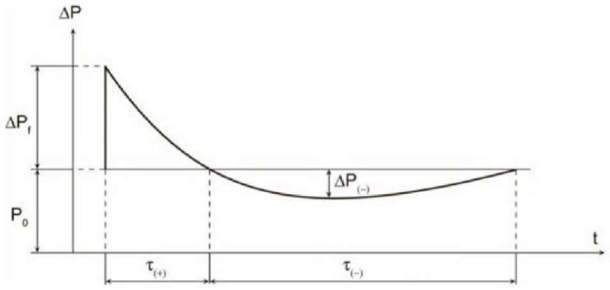
а) та д) тамбур всередині; б) та е) тамбур зовнішній симетричний;

в) та ж) тамбур зовнішній з заходом проти годинникової стрілки;

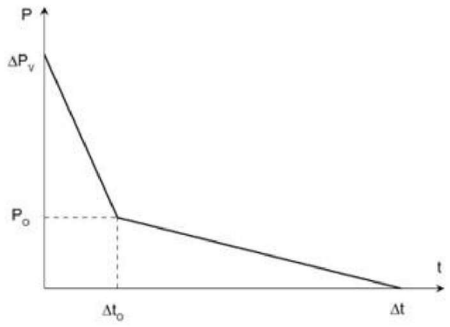
г) та з) тамбур зовнішній з заходом за годинниковою стрілкою.

14

Аналіз вибухового навантаження



Графік зміни тиску по фронту вибухової хвилі

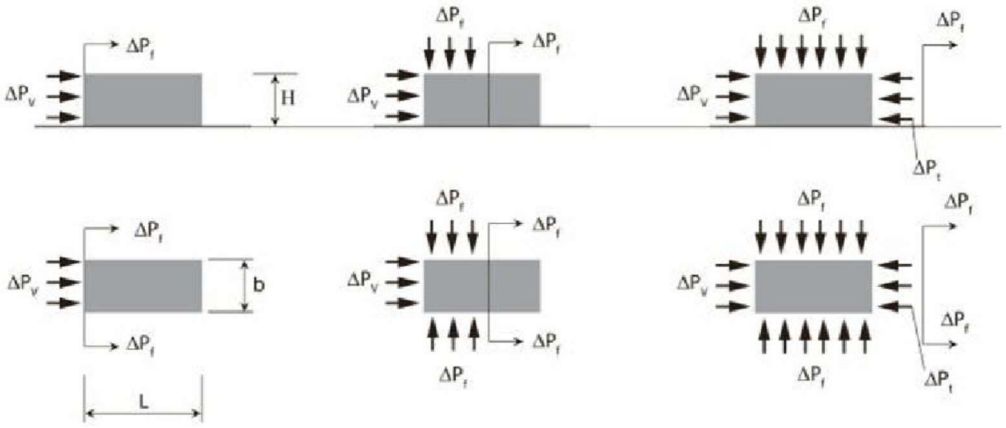


Графік тиску вибухової хвилі на споруду

визначаються за емпіричними формулами Садовського

15

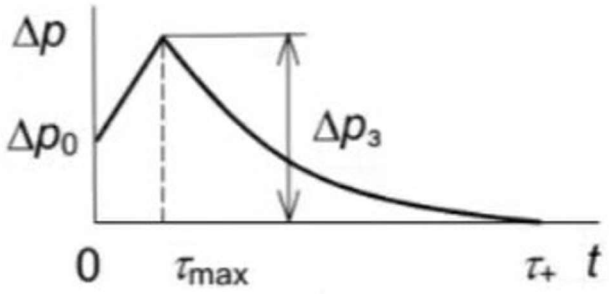
Аналіз вибухового навантаження



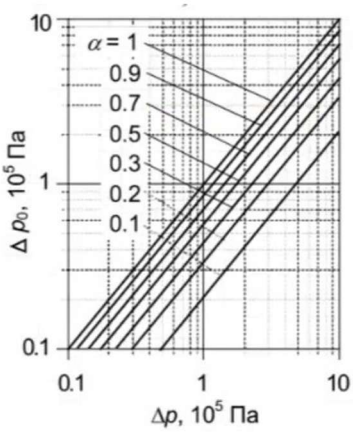
Загальний вплив вибухової хвилі на споруду

16

Аналіз вибухового навантаження



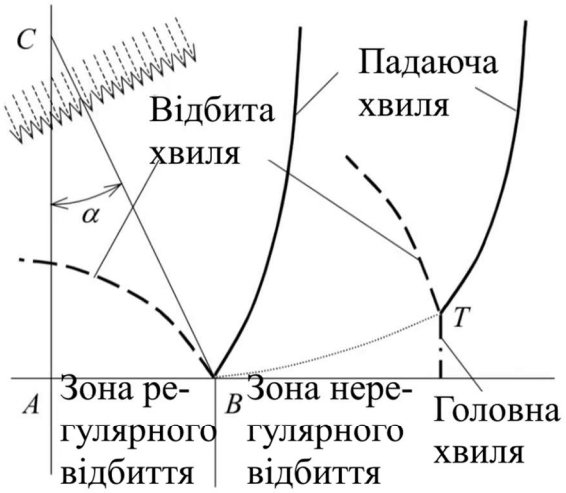
Тиск при затіканні повітряної ударної хвилі



Номограма визначення тиску проскоку Δp0, Па

17

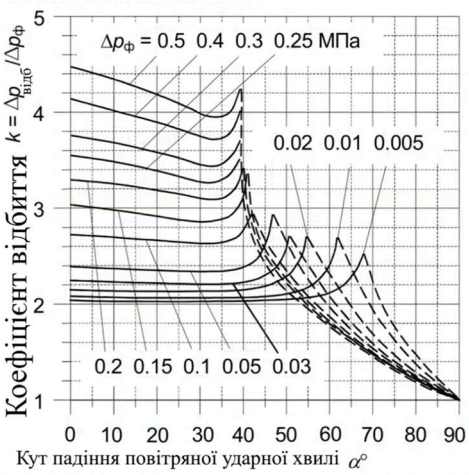
Аналіз вибухового навантаження



Відбиття повітряної ударної хвилі від пласкої перешкоди при різних кутах падіння

18

Аналіз вибухового навантаження

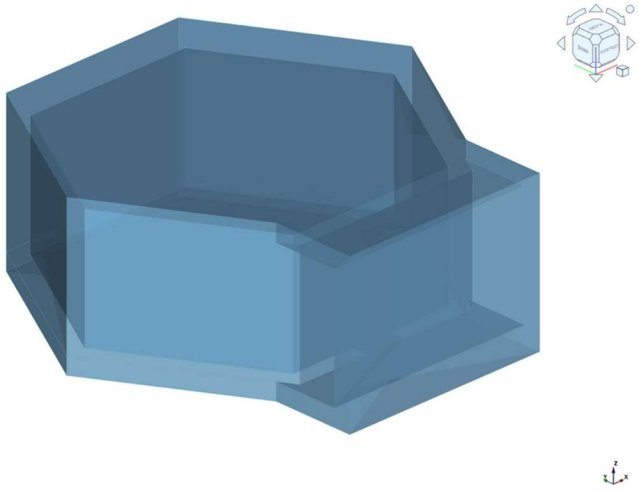


Діаграма для визначення тиску відбиття повітряної ударної хвилі від пласкої перешкоди при різних кутах падіння

19

Моделювання геометрії та матеріалів: бетон та арматура

№	Лінійний розмір	Величина, мм
1	бічна сторона правильного шестикутника зсередини	3500
2	Товщина стін	350
3	Товщина стелі	350
4	Товщина фундаменту	350
5	Висота стелі зсередини	2500
6	Ширина дверей	800
7	Висота дверей	2000
8	Ширина вхідного тамбура	1000
9	Довжина (бар'єра) вхідного тамбура	4300



Твердотільна модель укриття цивільного призначення

20

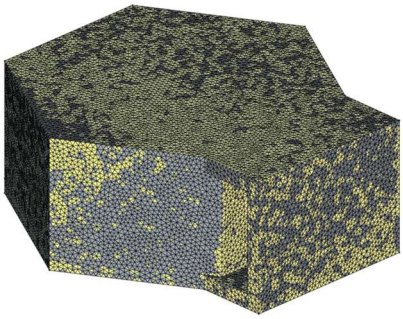
Моделювання геометрії та матеріалів: бетон та арматура

В роботі призначені такі властивості бетону важкого С25/30, як міцність, визначена на зразках-кубах fck.cube = 30 МПа; густина ρ = 2400 кг/м3; модуль Юнга І-го роду Е = 32·103 МПа; коефіцієнт Пуассона v=0,14.

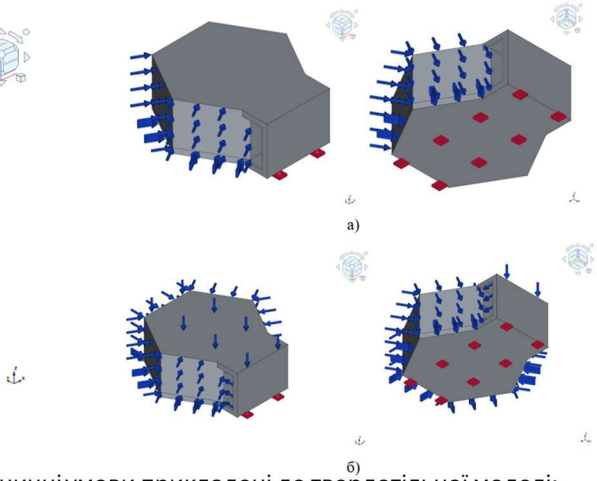
Аналогічно визначено властивості сталевого армування бетону на основі «узагальненої сталі» (Steal-Generic) для арматури класу А500С: тимчасовий опір σ = 500 МПа; густина ρ = 7900 кг/м3; модуль Юнга І-го роду Е = 2·10Е+5 МПа; коефіцієнт Пуассона v = 0,30.

21

Скінчено елементна модель та граничні умови до неї



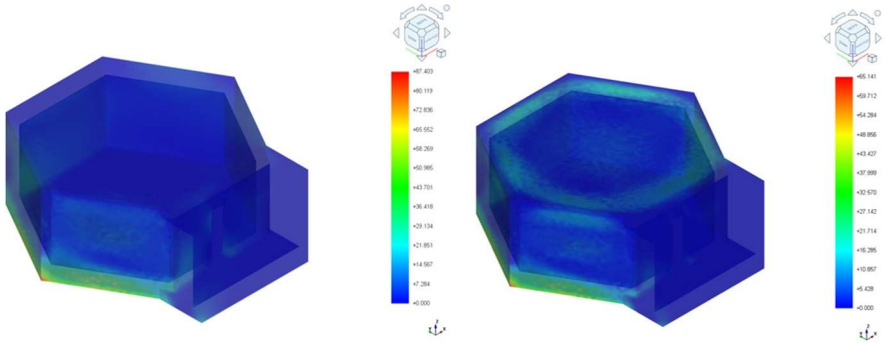
Скінчено елементна модель укриття цивільного призначення



Граничні умови прикладені до твердотільної моделі:
а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа);
б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа)

22

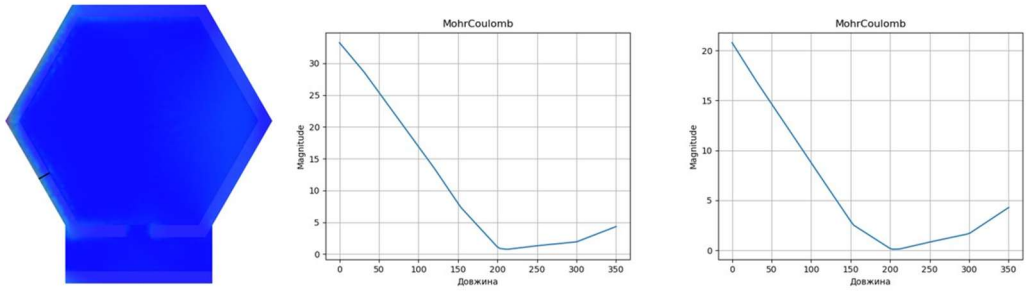
Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності



а) б)

Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion) для визначення напружених станів у бетоні (при товщині стін 0,350 м):
а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа);
б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа).

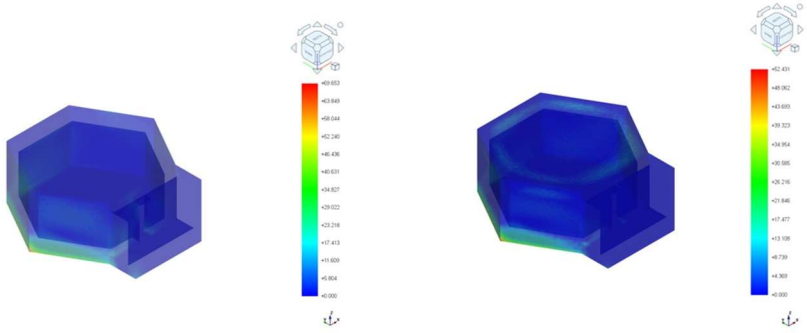
Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності



а) б) в)

Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion; V теорія міцності) у центрі мас стіни за товщиною у мм (при товщині стін 0,350 м): а) розташування перерізу; б) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа); в) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа).

Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності

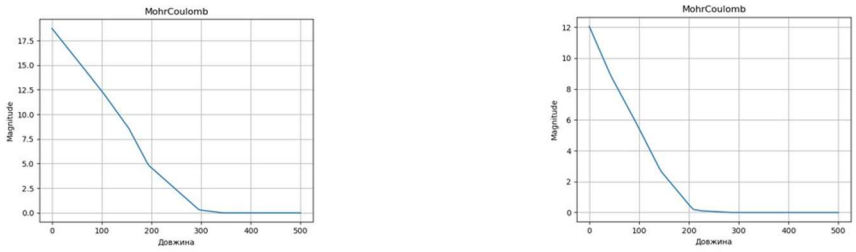


а) б)

Критерій міцності Мора (Coulomb Mohr criterion) для визначення напружених станів у бетоні (при товщині стін 0,500 м):
а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа);
б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа).

25

Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності

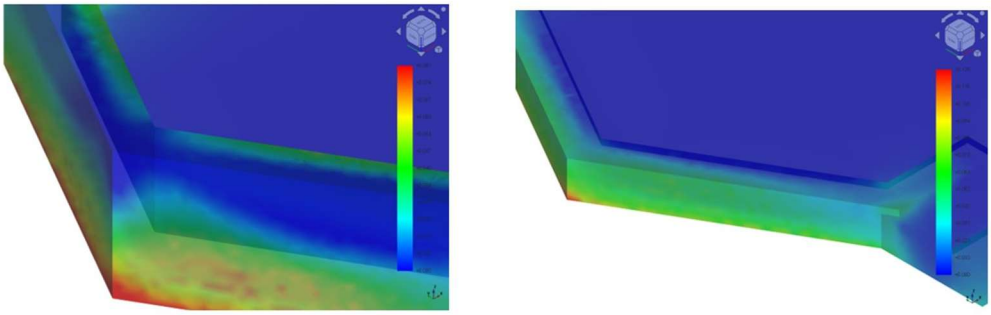


а) б)

Графік критерію міцності Мора (Coulomb Mohr criterion) у центрі мас стіни за товщиною у мм (при товщині стін 0,500 м):
а) для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа);
б) для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа).

26

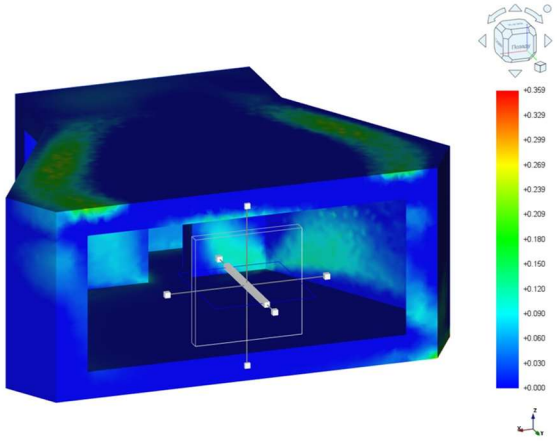
Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності



Ізополя армування здовж осі Z для початку взаємодії укриття з ударною хвилею (квазістатичний тиск віддзеркалення ΔPV = 3,144 МПа) у найбільш навантажених перерізах стіни

27

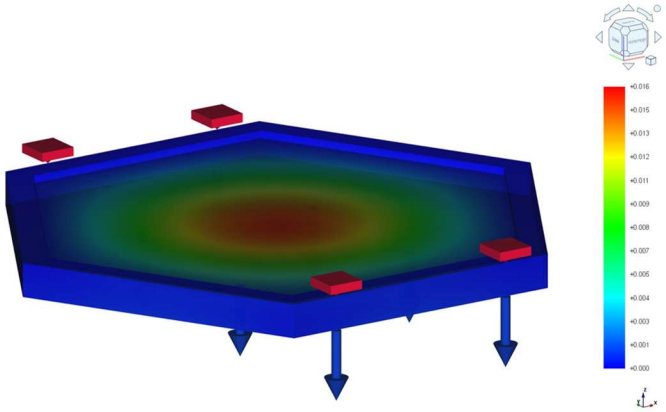
Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності



Ізополя армування здовж осі X для занурення укриття в ударну хвилю (квазістатичний тиск обтікання на фронтальну стіну ΔPV = 3,144 МПа, а на всі інші стіни та стелю діятиме тиск фронту ударної хвилі ΔPf = 0,769 МПа) у найбільш навантажених перерізах стелі

28

Чисельне розв’язання квазістатичної задачі міцності



Абсолютні лінійні переміщення плити фундаменту, м

29

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що з 2022 року основними загрозами для цивільних об’єктів є не лише прямі влучання, а й ураження уламками ракет, артилерійських снарядів та ударна хвиля. Тому проектування захисних споруд вимагає комплексного підходу, що враховує декілька типів загроз. Початковий розрахунок, заснований лише на одній загрозі – пробитті уламком (масою 10 г, швидкістю 1400 м/с). Показано, що для запобігання відколюванню бетону достатньою є товщина конструкції 178 мм. Прийняте на цьому етапі консервативне проектне рішення з товщиною 356 мм, хоч і відповідало вимогам ДБН, виявилося недостатнім.
2. Проаналізовано вимоги ДБН В.2.2-5:2023 та встановлено, що використання виключно емпіричних формул для розрахунку на пробиття є недостатнім для забезпечення повної безпеки. Доведено, що кращим підходом є поєднання нормативних розрахунків із симуляцією роботи композитної споруди. Ключовим результатом роботи стало виявлення того, що навантаження від вибухової хвилі є визначальним для несучої здатності конструкції.
3. Обґрунтовано та побудовано тривимірну скінчено-елементну модель протиуламкового укриття у програмному середовищі FreeCAD. Створена модель враховує фізико-механічні властивості армованого бетону як композитного матеріалу та дозволяє дослідити поведінку конструкції в умовах, наближених до реальних, із застосуванням спрощеної лінійної постановки задачі для оперативного інженерного аналізу.
4. За результатами числового дослідження напружено-деформованого стану виконано симуляцію впливу вибухового навантаження (еквівалент 150 кг тротилу на відстані 10 м, тиск 3,144 МПа).Скінчено-елементне моделювання чітко продемонструвало, що конструкція товщиною 350 мм не витримує квазістатичного тиску від вибуху. Аналіз за критерієм міцності Мора показав руйнування бетону від надмірних стискаючих напружень. Це доводить, що проектування виключно на опір уламкам є критичною помилкою.

30

ВИСНОВКИ

5. Головним практичним результатом роботи є науково-обґрунтоване конструктивне рішення для забезпечення надійності укриття. На основі результатів моделювання було доведено необхідність збільшення товщини всіх огороджувальних конструкцій (стін, покриття та фундаменту) до 500 мм. Повторний аналіз підтвердив, що така товщина забезпечує структурну цілісність споруди під дією розрахункового вибухового навантаження, утримуючи напруження в допустимих межах.
6. Запропоновано та обґрунтовано ефективні архітектурно-планувальні рішення. Для підвищення загального рівня захисту було запропоновано використання вхідного тамбура-лабіринту для запобігання прямому зальоту уламків та шестикутної форми споруди в плані, яка завдяки кращим аеродинамічним характеристикам, дозволяє знизити пікове навантаження від вибухової хвилі порівняно з традиційною прямокутною формою.
7. Продемонстровано ефективність застосування доступних інженерних інструментів для вирішення складних задач. Робота показала, що навіть безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, як-от FreeCAD, може бути потужним інструментом для попереднього структурного аналізу. Незважаючи на спрощення (лінійна постановка задачі), модель дозволила виявити фундаментальний недолік початкового проекту та обґрунтувати ключові конструктивні зміни.

Сумський національний аграрний університет

Дякую за увагу

Факультет будівництва та транспорту