

УДК 72.02

Кривенко О. В.¹, Плоский В. О.²¹доктор технічних наук, професор кафедри архітектурних конструкцій

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

knuba.o.v.k@gmail.com

orcid.org/0000-0002-8949-0944

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри архітектурних конструкцій

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ploskyi.vo@knuba.edu.ua

orcid.org/0000-0002-2632-8085

ЗЕЛЕНІ НАСАДЖЕННЯ ЯК ЕЛЕМЕНТ ВИБУХОЗАХИСТУ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

© Кривенко О. В., Плоский В. О., 2026

<https://doi.org/10.32347/2519-8661.2026.35-36.290-294/>

Анотація: У статті розглядається питання пошуку інноваційних методів захисту міського середовища від вибухових загроз, спричинених техногенними аваріями, терористичними актами або військовими конфліктами. Традиційні захисні споруди попри їх ефективність переважно мають агресивний візуальний вигляд і створюють психологічний тиск, що суперечить принципам сучасного відкритого суспільства. Відтак, актуальним є впровадження рішень, які поєднують безпекову функцію з екологічною та естетичною регенерацією захисних рішень на основі зелених насаджень. Дана стаття є аналітичним оглядом досліджень для систематизації знань за заданою темою.

У межах огляду автори аналізують дослідження, де представлена фізика взаємодії вибухової хвилі як з традиційними захисними конструкціями, так і з масивом із рослин. Огляд охоплює широкий спектр досліджень — від концепції ООН щодо «зеленої інфраструктури» як захисту від стихійних лих до вузькоспеціалізованих праць із вивчення динамічної реакції конкретних видів рослин.

Зазначено, що впровадження поняття «біофільної стійкості» дозволяє розглядати зелені насадження не просто як декор, а як ефективні вибухопоглинальні системи, особливо біля лікарень, шкіл та житлових кварталів. Захисний ефект досягається завдяки складній сукупності фізичних процесів, що включає відбиття фронту хвилі на межі «рослинистість-повітря», дифракції, розсіювання енергії через непружну деформацію гілок та листя, а також створення турбулентних потоків, що порушують цілісність ударного фронту. Для практичного впровадження автори визначили три критичні вимоги до вибухостійких рослин: вічнозеленість (для цілорічного захисту), висока щільність крони та структурна некрихкість матеріалу. Автори доходять висновку, що хоча зелені насадження не можуть повністю замінити конструктивний вибухозахист, вони є незамінним елементом гібридних систем безпеки. Проектування таких вибухозахисних рішень має базуватися на цифровому моделюванні та просторовому аналізі, що дозволить створити безпечне, стійке та комфортне міське середовище. Дана робота закладає підґрунтя для подальших досліджень з метою розробки нормативних рекомендацій у галузі архітектурного проектування та ландшафтного дизайну спеціального призначення.

Ключові слова: зелені насадження, вибухозахисні конструкції, живопліт, дерева, міський захист, безпека середовища, архітектурне проектування.

Вступ.

Зростаюча загроза вибухонебезпечних інцидентів у міських умовах внаслідок техногенних катастроф, терористичних атак, військових конфліктів вимагає розробки інноваційних стратегій, які б органічно інтегрувалися у містобудування та ландшафтну архітектуру. Забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури та міського середовища в умовах сучасних загроз традиційно покладається на використання спеціалізованих захисних бар'єрів. Попри високу ефективність, традиційні вибухозахисні конструкції виглядають візуально агресивними, що створює психологічний тиск на населення та суперечить концепції відкритого сучасного суспільства. У зв'язку з цим, актуальним напрямком досліджень стає інтеграція природних компонентів у системи безпеки, де зелені насадження розглядаються як елемент багатофункціонального захисного середовища. Перевага такого підходу полягає в тому, що він поєднує безпекову функцію з екологічною, мікрокліматичною та містобудівною. Це особливо важливо для житлової, освітньої, медичної та громадської забудови, де не завжди можливо встановити масивні захисні споруди без втрати якості середовища. Попри очевидні переваги, потенціал дерев та чагарників як природних захисних бар'єрів досі не отримав практичного впровадження. Слід відзначити, що наявний науково-дослідний доробок у цій галузі є фрагментарним та потребує аналізу для систематизації та впровадження у проєктні рішення.

Мета дослідження.

Узагальнення наукових досліджень і проєктних підходів щодо використання зелених насаджень для послаблення наслідків вибухової хвилі, а також формулювання практичних висновків для архітектурного проектування.

Основна частина дослідження.

Сучасні міські середовища стикаються з дедалі ширшим спектром вибухонебезпечних загроз від промислових вибухів, терористичних атак та військових конфліктів. Як зазначається у дослідженні [5], ущільнення міського середовища з концентрацією критичної інфраструктури, комерційних центрів та житлових районів з високою кількістю населення робить сучасні міста особливо вразливими до пошкоджень, спричинених вибухами. Поширення вибухових хвиль у місті створює складні схеми ударних хвиль, що характеризуються явищами відбиття та підсилення, які значно посилюють потенціал структурних пошкоджень та жертв. Фізика взаємодії вибухової хвилі з міськими спорудами характеризується утворенням фронтів високого тиску, які надзвучово розширюються від джерела вибуху, створюючи надлишковий тиск, здатний спричинити катастрофічне руйнування споруд, осколкові поранення та травмування людей. У [1] надається вичерпний огляд взаємодії вибухової хвилі зі спорудами, визначаються ключові механізми (пряме навантаження, відбиття удару, дифракція тощо). Здавна стратегії захисту базуються переважно на масивних, жорстких штучних бар'єрах (кам'яних стінах, земляних валах та залізобетонних спорудах) які, хоча й є ефективними для пом'якшення наслідків вибухів, створюють візуальні проблеми з точки зору естетики, екології та містобудування.

При цьому озеленення міст традиційно розглядається переважно крізь призму екологічної стійкості, поліпшення естетичного вигляду та сприяння охороні здоров'я населення. Однак останні дослідження виявили невикористаний потенціал рослинності як активного, адаптивного захисного елементу в рамках цивільної оборони [3]. Як зазначається у [4] інтеграція захисної зеленої інфраструктури в генеральні плани міст є поєднанням вимог безпеки з цілями сталого міського розвитку, пропонуючи те, що було названо «біофільною стійкістю». Концепцію «зеленої

інфраструктури як найкращого захисту природи від стихійних лих» просуває Програма ООН з навколишнього середовища, підкреслюючи багатофункціональні переваги міського озеленення [6].

Так у дослідженні [2] представлено експериментальні результати щодо взаємодії ударних хвиль з деревами, оцінюючи їх високий потенціал як природних захисних бар'єрів. Дослідження [2] є одним із перших систематичних досліджень взаємодії вибухової хвилі з повнорозмірними деревами, що характеризує явища відбиття, дифракції та проходження ударної хвилі. Повнорозмірні дерева піддавалися впливу імітованих вибухових навантажень далекого радіуса дії, створюваних за допомогою Advanced Blast Simulator. Було досліджено динамічну структурну реакцію дерев *Juniperus Spartan*, що зазнали впливу вибухової хвилі, та їх потенціал для захисту від вибуху. Наукова цінність цього напряму полягає в переході від загального твердження про користь рослинності до конкретного моделювання дії вибухової хвилі в залежності від геометрії насаджень. Отриманий висновок для проєктування визначено в тому, що одиночне дерево не слід вважати повноцінним бар'єром; потрібна система з кількох рядів, підліску й кущового ярусу.

У статті [3] представлені експериментальні дослідження щодо потенціалу живоплотів у пом'якшенні вибухової хвилі. Вони показали, що рослини з певними характеристиками можуть зменшити надлишковий тиск вибухової хвилі на понад 40% порівняно з її безперешкодним поширенням. Автори визначили, що живоплоти є найбільш керованою формою рослинного захисту, оскільки їх можна проєктувати за висотою, товщиною, кількістю рядів і щільністю. Цінність такого підходу полягає в тому, що живопліт можна розглядати як пористу, масштабовану й відтворювану захисну систему. У дослідженні було введено поняття біомаси для опису стебел/стовбурів, гілок та листя живоплотів. Автори доводять, що голкоподібне листя живоплоту з туї виявилось набагато міцнішим, ніж листяний живопліт з лаврового дерева. Водночас ефективність в першу чергу залежить від неперервності масиву, щільності крони та коректного розміщення відносно джерела вибуху і захищуваного об'єкта. Визначені в цьому дослідженні вимоги до вибухостійких рослин включають:

- вічнозелене листя для збереження цілорічної захисної щільності;
- щільну, непрозору крону для збільшення взаємодії перешкоди з ударними хвилями;
- некрихкість матеріалу для забезпечення структурної цілісності під динамічним навантаженням.

Нещодавні дослідження природних рішень для регенерації міських набережних, представлені у [4], виявили потенціал для гібридних систем, що інтегрують рослинність із традиційними захисними спорудами. Ці гібридні підходи пропонують перспективні моделі для застосувань захисту від вибухів, поєднуючи енергопоглинаючі характеристики рослинності зі структурною надійністю інженерних бар'єрів. Спроектвані рослинні бар'єри можуть функціонувати як системи, що поглинають енергію, здатні послаблювати ударні хвилі за допомогою численних фізичних механізмів, зокрема:

- відбиття та дифракції ударної хвилі на межі розділу «рослинність-повітря»;
- розсіювання енергії через непружну деформацію рослинного матеріалу;
- поглинання імпульсу за допомогою сил опору, що діють на рослинні елементи;
- утворення турбулентного потоку, що порушує поширення фронту ударної хвилі.

У розглянутих вище дослідженнях зазначається важлива роль цифрових інструментів комп'ютерного моделювання, що дозволяють ефективно оцінювати взаємодію потоку з пористим бар'єром. Структурні характеристики окремого дерева, а саме оптична та об'ємна пористість, є ключовими факторами захисного ефекту. Ефективність природного бар'єра визначається не лише наявністю рослин, а й їхньою морфологією та структурою, що потребує цифрового моделювання зелених насаджень у різних сценаріях вибухозахисту міської забудови.

Отримані у розглянутих дослідженнях результати свідчать, що зелені насадження не слід розглядати як повноцінну заміну конструктивному вибухозахисту, однак вони можуть суттєво зменшити інтенсивність впливу вибухової хвилі у міській забудові. Їхня роль полягає у створенні буферної, пористої та енергопоглинальної зони, яка працює в комплексі з просторовими розривами,

земляними валами, екранами та раціональним розміщенням споруд. Найбільш перспективною є не одиночна посадка, а багатошарова система із дерев середнього та великого розміру, підліску, кущів та живоплотів. Саме така конфігурація забезпечує більшу товщину бар'єра, кращу взаємодію з потоком і більшу ймовірність ослаблення вибухової хвилі до досягнення фасаду будівлі. З погляду архітектури і містобудування зелені бар'єри доцільно використовувати насамперед у зонах, де необхідно поєднати безпеку, комфорт і екологічну якість простору, а саме біля житлових будинків, шкіл, лікарень, громадських будівель і об'єктів критичної інфраструктури. Такий підхід дозволяє інтегрувати вибухозахист у концепцію сталого й стійкого міста.

Висновки.

Зелені насадження мають потенціал для зменшення наслідків вибухової хвилі, особливо коли вони використовуються як системно спроектовані бар'єри. Найкращі результати дають щільні живоплоти, багаторядні деревні смуги та комбіновані рослинні композиції, здатні діяти як пористі енергопоглинальні структури. Наукові публікації підтверджують, що ефективність таких систем визначається пористістю, щільністю, геометрією, відстанню до об'єкта та типом рослинності. Це означає, що проектування зелених захисних зон має базуватися на експериментальних даних, чисельному моделюванні та просторовому аналізі. Для архітектурної та будівельної практики доцільно розвивати окрему типологію захисного озеленення, у якій рослинність розглядається не тільки як естетичний чи екологічний компонент, а як елемент системи безпеки міського середовища. Подальші дослідження доцільно спрямувати на параметризацію таких бар'єрів, їх комп'ютерного моделювання, проведення експериментальних перевірок і, відповідно, розроблення рекомендацій для міського проектування.

Бібліографія

1. Isaac, O.S., Alshammari, O.G., Pickering, E.G. et al. (2023) Blast wave interaction with structures – an overview. *International Journal of Protective Structures*, 14 (4). pp. 584630. ISSN: 2041-4196 <https://doi.org/10.1177/20414196221118595>
2. Gan, E. C. J., Remennikov, A., & Ritzel, D. (2021). Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment. *International Journal of Impact Engineering*, 158, 104004. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104004>
3. Gebbeken, Norbert & Warnstedt, Paul & Rüdiger, Lars. (2017). Blast protection in urban areas using protective plants. *International Journal of Protective Structures*. 9.(11):204141961774600. <https://doi.org/10.1177/2041419617746007>
4. Marzio, S., Tosi, J., Poggi, F., & Amado, M. (2026). Nature-based solutions for urban waterfront regeneration: a systematic review of frameworks, strategies and applications. *City and Environment Interactions*, 29, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100281>
5. Ratcliff, A., Rigby, S., Clarke, S., & Fay, S. (2023). A Review of Blast Loading in the Urban Environment. *Applied Sciences*, 13(9), 5349. <https://doi.org/10.3390/app13095349>
6. United Nations Environment Programme. (2019, November 20). Green infrastructure: Nature's best defence against disasters. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/green-infrastructure-natures-best-defence-against-disasters>

Olga Krivenko¹, Vitalii Ploskyi²

¹ *Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural Structures
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv*

*knuba.o.v.k@gmail.com
orcid.org/0000-0002-8949-0944*

² *Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Architectural Structures
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv*

*ploskyi.vo@knuba.edu.ua
orcid.org/0000-0002-2632-8085*

GREEN PLANTINGS AS AN ELEMENT OF EXPLOSION PROTECTION IN THE URBAN ENVIRONMENT

© Krivenko O. V., Ploskyi V. O., 2026

Abstract: This article examines the issue of finding innovative methods to protect the urban environment from explosive threats caused by industrial accidents, terrorist acts, or military conflicts. Traditional protective structures, despite their effectiveness, tend to have an aggressive visual appearance and create psychological pressure, which contradicts the principles of a modern open society. Therefore, it is important to implement solutions that combine security functions with the ecological and aesthetic regeneration of protective measures based on green spaces. This article is an analytical review of research aimed at systematizing knowledge on the given topic.

In this review, the authors analyze studies that examine the physics of shock wave interactions with both conventional protective structures and vegetation. The review covers a wide range of studies—from the UN’s concept of “green infrastructure” as protection against natural disasters to highly specialized works on the dynamic response of specific plant species.

It is noted that the introduction of the concept of “biophilic resilience” allows green spaces to be viewed not merely as decoration, but as effective blast-absorbing systems, especially near hospitals, schools, and residential neighborhoods. The protective effect is achieved through a complex set of physical processes, including the reflection of the shock wave at the “vegetation-air” interface, diffraction, energy dissipation through the inelastic deformation of branches and leaves, as well as the creation of turbulent flows that disrupt the integrity of the shock front. For practical implementation, the authors identified three critical requirements for blast-resistant plants: evergreen foliage (for year-round protection), a dense canopy, and structural resilience. The authors conclude that while green plantings cannot fully replace structural blast protection, they are an indispensable element of hybrid safety systems. The design of such blast-resistant solutions should be based on digital modeling and spatial analysis, which will enable the creation of a safe, sustainable, and comfortable urban environment. This work lays the groundwork for further research aimed at developing regulatory recommendations in the field of architectural design and specialized landscape design.

Keywords: green plantings, blast-resistant structures, hedges, trees, urban protection, environmental safety, architectural design