

© Л.В. Шайдецька<sup>1</sup>, Н.В. Зуєвська<sup>1</sup>, Д.Г. Дармостук<sup>1</sup>, Р.І. Семчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

L. Shaydetska<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6593-0255>

N. Zuevska<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1716-1447>

D. Darmostuk<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0009-0002-3714-9821>

R. Semchuk<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0009-0007-1336-6246>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

## THE USE OF MULTILAYER STRUCTURES TO INCREASE THE PROTECTIVE PROPERTIES OF DUAL-PURPOSE UNDERGROUND STRUCTURES

**Мета.** Обґрунтування та розробка комплексного підходу до оптимізації захисних властивостей конструкцій за рахунок впровадження багатошарових систем.

**Методика.** В основу дослідження покладено метод скінченно-елементного аналізу, реалізований за допомогою програмного комплексу ANSYS Explicit Dynamics, що дозволяє моделювати високошвидкісні нелінійні процеси деформування. Методика передбачає врахування ефектів компактності пор у ґрунті, нелінійного стискання та пластичного деформування матеріалів.

**Результати.** Проведені чисельні експерименти дозволили кількісно оцінити ефективність застосування додаткових захисних шарів. Встановлено, що впровадження проміжного залізобетонного шару сприяє перерозподілу енергії вибуху та суттєвому зниженню амплітуди розтягальних напружень у внутрішніх елементах конструкції та навколишньому ґрунті. Отримані дані підтверджують, що багатошарова структура діє як демпфуючий бар'єр, що знижує концентрацію напружень у найбільш вразливих зонах підземної споруди, запобігаючи її прогресуючому обваленню.

**Наукова новизна.** У роботі вперше отримано комплексні залежності, що описують вплив геометричної конфігурації та фізико-механічних характеристик шарів багатошарової системи на загальну стійкість споруди. Поглиблено розуміння механізмів енергопоглинання в системі «залізобетонна конструкція – пористий ґрунтовий масив» за умов надшвидкого навантаження.

**Практична значимість.** Результати дослідження мають пряме прикладне значення для інженерної галузі, зокрема для проектування нових та модернізації існуючих об'єктів цивільного захисту, транспортних тунелів та споруд критичної інфраструктури. Запропоновані розрахункові моделі та встановлені закономірності дозволяють обґрунтовано підходити до вибору товщини та матеріалів захисних екранів, що забезпечує підвищення безпеки персоналу та збереження матеріальних цінностей.

**Ключові слова:** підземні споруди, вибухове навантаження, багатошарова конструкція, залізобетон, пористий ґрунт, напружено-деформований стан, ANSYS Explicit Dynamics, динамічна стійкість.

**Вступ.** У зв'язку зі зростанням ризиків техногенного та військового характеру, особливу увагу приділяють підвищенню стійкості та захисних властивостей підземних споруд подвійного призначення. Підземні споруди подвійного призначення – це об'єкти, які в мирний час виконують цивільні функції (метрополітен, паркінги, комунікаційні колектори), а в надзвичайних ситуаціях – слугують укриттями для населення або персоналу. Пошкодження підземних споруд в основному спричинені вибуховими хвилями, з одного боку, через відсутність ефекту загасання тобто проникнення високоінтенсивних та короткочасних вибухових хвиль безпосередньо в конструкцію, викликаючи пряму руйнівну загрозу. З іншого боку, сильні відбиваючі розтягуючі хвилі будуть утворюватися, коли вибухова хвиля поширюється на вільну поверхню в нижній частині конструкції, що призведе до обвалу або ефекту відколу [1].

Тому для поліпшення противибухових характеристик підземних споруд можна використовувати багатошарові конструкції у вигляді плит.

Будь яка багатошарова конструкція – це система, що складається з кількох функціональних шарів, кожен з яких виконує специфічну роль, а саме зовнішній шар повинен бути протиударним, стійким до динамічних навантажень (бетон високої міцності, армовані панелі), а наступні повинні виконувати енергопоглинаючі або демпфуючі функції.

Метою досліджень є визначення антивибухових характеристик багатошарової захисної структури для покращення захисних властивостей підземних споруд подвійного призначення.

**Основний виклад матеріалу.** Традиційно для обвалування споруд наприклад, використовують пісок і ґрунт так як вони мають здатність розсіювати хвилі, мають низьку вартість і необмежені об'єми. Однак пісок і ґрунт мають низьку стійкість до статичного навантаження, сильне водопоглинання та велике значення повзучості. Тому захисна ефективність багатошарового обвалування з ґрунту і піску буде значною мірою обмежена. Крім того, зі збільшенням точності влучання та руйнівної сили зброї зростає попит на противибухові характеристики захисних споруд у вигляді багатошарових плит. Тому у цій статті розглядається модель поведінки багатошарової захисної конструкції типу «залізобетонна плита – ґрунтовий масив». Запропоновано методику чисельного аналізу хвильових процесів у конструкціях із захисними прошарками з пористих матеріалів. Ґрунт при моделюванні розглядається як пористий матеріал, в якому під час ударно-вибухового впливу поширюється ударна хвиля, що спричиняє послідовну зміну стану пористого середовища: первинне руйнування перемичок порожнин (осередків) пористої структури; подальше ущільнення матеріалу (компакція); закриття пор за досягнення густини «костяка» (скелета) матеріалу; стискання скелета з подальшим зростанням тиску та зсувних деформацій у матриці.

Ґрунти за своєю природою на рівні напружень до  $\sim 0,1-0,3$  МПа переважно демонструють пружну поведінку, а із підвищенням навантаження проявляються в'язкі, пластичні та нелінійні ефекти. Нелінійність зумовлена мікроруйнуванням структури під час стиску, що супроводжується еволюцією фізико-механічних характеристик: зміною густини, модуля деформації, коефіцієнта Пуассона тощо. Питання деформування ґрунтів широко висвітлені у літературі, де накопичено

грунтовну експериментальну базу щодо напружено-деформованого стану ґрунтових середовищ [2–4].

Для оцінювання стійкості підземних споруд до динамічного навантаження критично важливо враховувати динамічний напружено-деформований стан ґрунту навколо об'єкта. Для моделювання багатошарової системи «залізобетонна плита – ґрунтовий масив» в ANSYS Explicit Dynamics застосуємо кілька матеріальних моделей:

- для моделювання поведінки динамічного навантаження та взаємодії його з повітрям та ґрунтовим масивом (твердим тілом) використаємо матеріальну модель TNT, основні параметри якої наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри матеріальної моделі TNT

Параметр	Одиниці	Значення
Щільність	кг/м <sup>3</sup>	1630
Швидкість детонації	м/с	~6900
Енергія вибуху	МДж/кг	~4.2
Тиск у продуктах вибуху	ГПа	До 20
Параметри JWL EOS (A, B, R1, R2, $\omega$ )	–	Залежить від калібрування моделі
Початкова температура	К	298

- для опису поведінки бетону під дією динамічних навантажень, використовуємо модель “CONC-35MPa” зі стандартної бібліотеки ANSYS, яка базується на нелінійних моделях міцності, рівняннях стану та критеріях руйнування. Основні параметри вводу наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри матеріальної моделі “CONC-35MPa”

Параметр	Одиниці	Значення
Щільність	кг/м <sup>3</sup>	2400
Міцність на стиск	МПа	35
Міцність на розтяг	МПа	3.5
Модуль пружності	МПа	30
Коефіцієнт Пуассона	–	0.2
Швидкість звуку	м/с	~3500
Модель міцності	–	RHT Concrete Model
Модель EOS (Equation of State)	–	Polynomial EOS
Гранична пластична деформація	–	0.01–0.03
Максимальний тиск руйнування	МПа	100–150
Коефіцієнт пористості	–	0.05–0.1
Критерій пошкодження	–	За деформацією або тиском

- для моделювання динамічної поведінки піщаних ґрунтів під впливом високошвидкісних навантажень застосуємо спеціалізовану матеріальну модель “SAND DP4”, основні параметри якої наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри матеріальної моделі “SAND DP4”

Параметр	Одиниці	Значення
Початкова щільність	кг/м <sup>3</sup>	1750
Коефіцієнт пористості	безрозмірний	0.35
Модуль пружності	МПа	0.05
Кут внутрішнього тертя	градуси	30
Коефіцієнт дилатансії	безрозмірний	0.1
Граничний тиск ущільнення	МПа	10
Модель міцності	–	Drucker–Prager
Модель EOS (Equation of State)	–	Porous EOS або таблична EOS
Модель пошкодження	–	За тиском або деформацією
Швидкість звуку в матеріалі	м/с	400

- для матеріальної моделі повітря Air (Atmospheric), що дозволяє моделювати взаємодію між атмосферним середовищем і ґрунтовим масивом при динамічних навантаженнях введемо наступні параметри, а саме форму задамо прямокутний паралелепіпед з квадратною основою 40 м × 40 м, вистою 4 м, тип матеріалу – ідеальний газ. Основні параметри матеріальної моделі наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Основні параметри моделі Air (Atmospheric)

Параметр	Одиниці	Значення
Щільність	кг/м <sup>3</sup>	1.225
Температура	К	288.15
Газова стала	Дж/(кг·К)	287.058
Коефіцієнт теплового розширення	–	~0.0034
В'язкість	–	–
Теплопровідність	–	–

У кожному випадку розв'язку задачі модель включає чотири окремі тіла, які реалізуються з використанням Ейлерівського та Лагранжевого формалізмів.

Схема взаємодії між тілами в ANSYS Explicit Dynamics наведена на рис. 1 [5, 6]. Ейлерівське тіло TNT не деформується геометрично, матеріал проходить крізь фіксовану сітку. Дозволяє точно описати швидкі фазові переходи та утворення продуктів вибуху при цьому ініціація вибуху задається окремо (точка або область). Ейлерівське тіло повітря – передає тиск та враховується як середовище до розповсюдження хвиль. Лагранжеве геологічне тіло деформується разом із сіткою, дозволяє відстежувати зсуви, ущільнення та враховує пористість, пластичність, дилатансію.

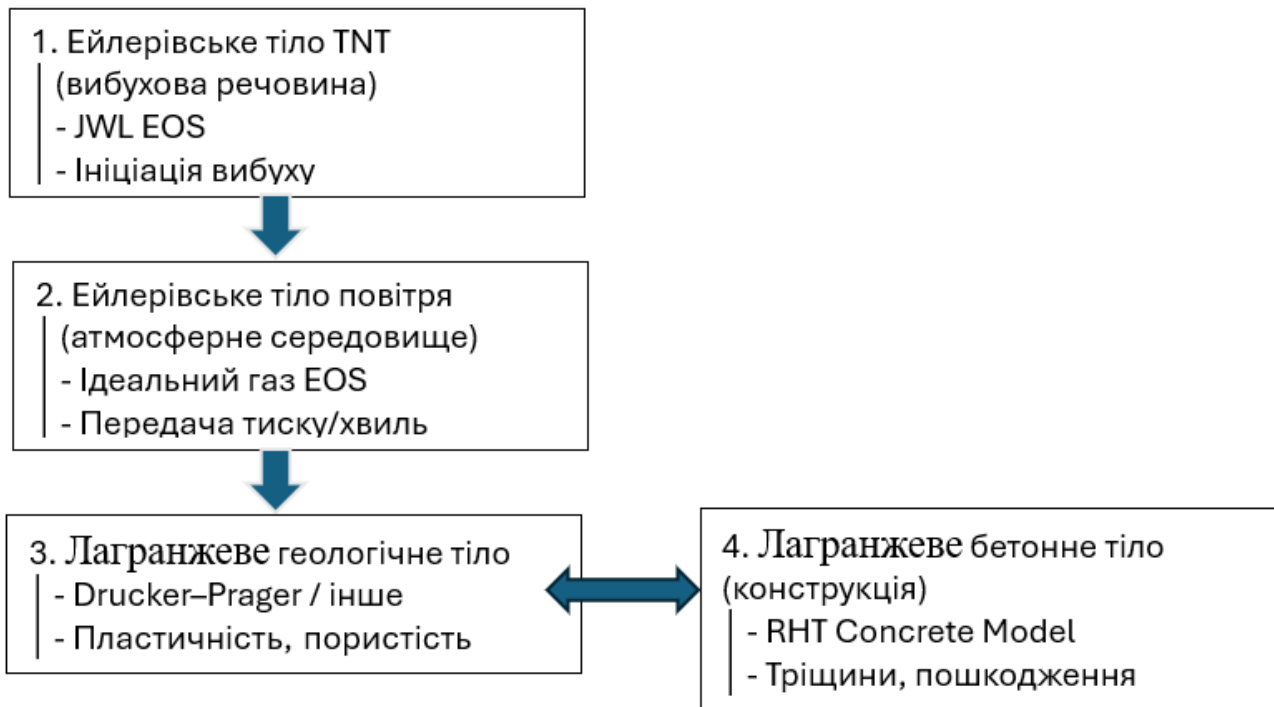


Рис. 1. Схема взаємодії між тілами в ANSYS Explicit Dynamics

Лагранжеве тіло бетонної конструкції взаємодіє з геологічним тілом та повітрям, враховує тріщиноутворення, залишкову міцність, накопичення пошкоджень. Розрахункова сітка моделі - поєднання Лагранжевої та Ейлервської сітки (рис. 2).

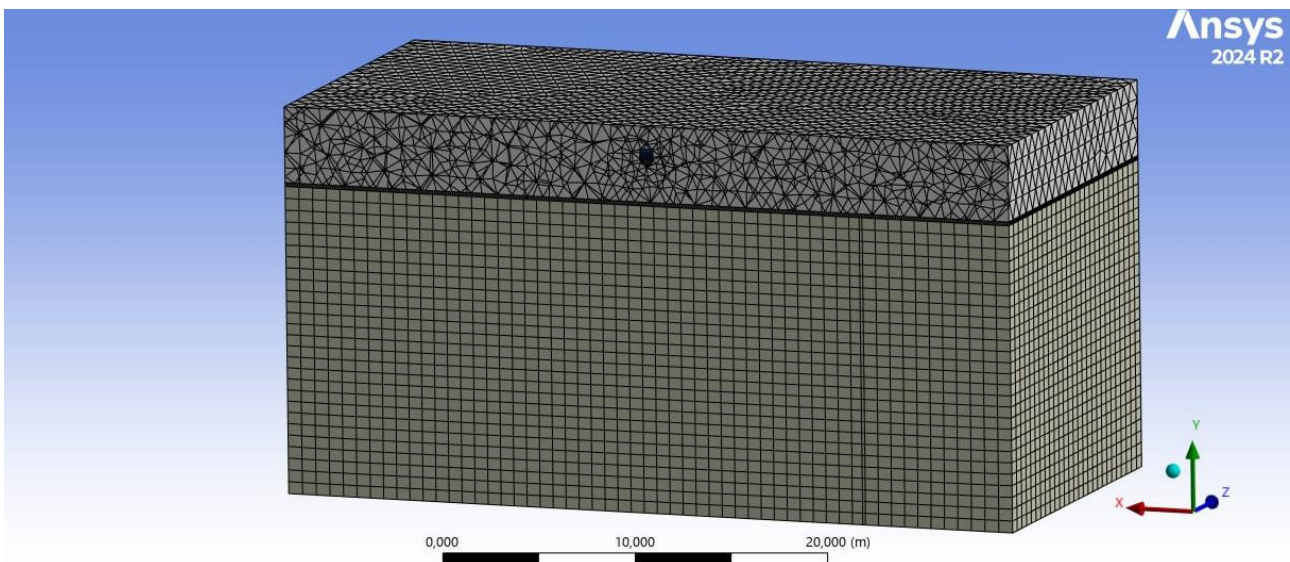


Рис. 2. Розрахункова сітка

Для цілей моделювання і оптимізації розмірність сітки визначена як 1 м для ґрунту та 0,15 метрів для плити, 0,3 метри для осередку формування динамічного навантаження. Кількісні характеристики сітки: 354685 вузлів і 265494 елементів сітки для ґрунтового масиву та плити 0,2 метри товщиною.

Динамічні навантаження на підземні споруди у ґрунтовому масиві, який сам є нелінійним, анізотропним і чутливим до тиску матеріалом, створюють комбінований напружений-деформований стан: розтяг, стиск, зсув, вигин, кручення. Такий НДС описується тензором напружень  $3 \times 3$ , що включає дев'ять компонентів, а для його оцінки застосовують еквівалентне напруження (1) [7–9].

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}{2}}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  – нормальні напруження, що діють відповідно осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{yz}$  – дотичні напруження, що виникають на площинах перпендикулярних відповідним осям.

$\sigma_v$  – скалярна величина, яка дозволяє порівнювати багатовісний стан із результатами простого одноосьового випробування, для цього використовується критерій Мізеса, який описує стан коли матеріал переходить у текучість, коли  $\sigma_v$  перевищує границю текучості.

Для металевих елементів підземної споруди (оболонки, арматура) цей критерій є базовим.

Напруження за Мізесом можна обчислити як за компонентами напружень, що описуються тензором напружень, так і за головними напруженнями (2).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, \quad (2)$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – головні нормальні напруження, що діють у точці тіла, коли дотичні напруження на цих площинах дорівнюють нулю.

Будь-який із наведених нижче виразів дає однакове значення напруження Мізеса,  $\sigma_v$ , для заданого напруженого стану.

Для крихких матеріалів, таких як бетон, більше орієнтуються на головне розтягальне напруження  $\sigma_1$  (Max Principal) або найменше стискальне  $\sigma_3$ , порівнюючи з міцністю на розтягнення/стиск.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq R_t \\ |\sigma_3| &\leq R_c, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\sigma_1$  – найбільше головне напруження (максимальний розтяг),  $R_t$  – розрахунковий опір матеріалу розтягу,  $\sigma_3$  – найменше головне напруження,  $R_c$  – розрахунковий опір матеріалу стиску.

Для ґрунтів рекомендується обирати критерій Mohr–Coulomb або Drucker–Prager, в яких враховується чутливість ґрунтів до тиску (коефіцієнт щеплення  $c$  та кут внутрішнього тертя  $\varphi$ ). При цьому «еквівалентне» напруження виражається через величини середнього тиску та зсуву, а перевірка ведеться на досягнення поверхні текучості/міцності, що залежить від середнього тиску [10, 11].

Максимальні напруження на розтяг ґрунтового масиву без та в присутності залізобетонної плити товщиною 0,2 м показано на рис. 3.

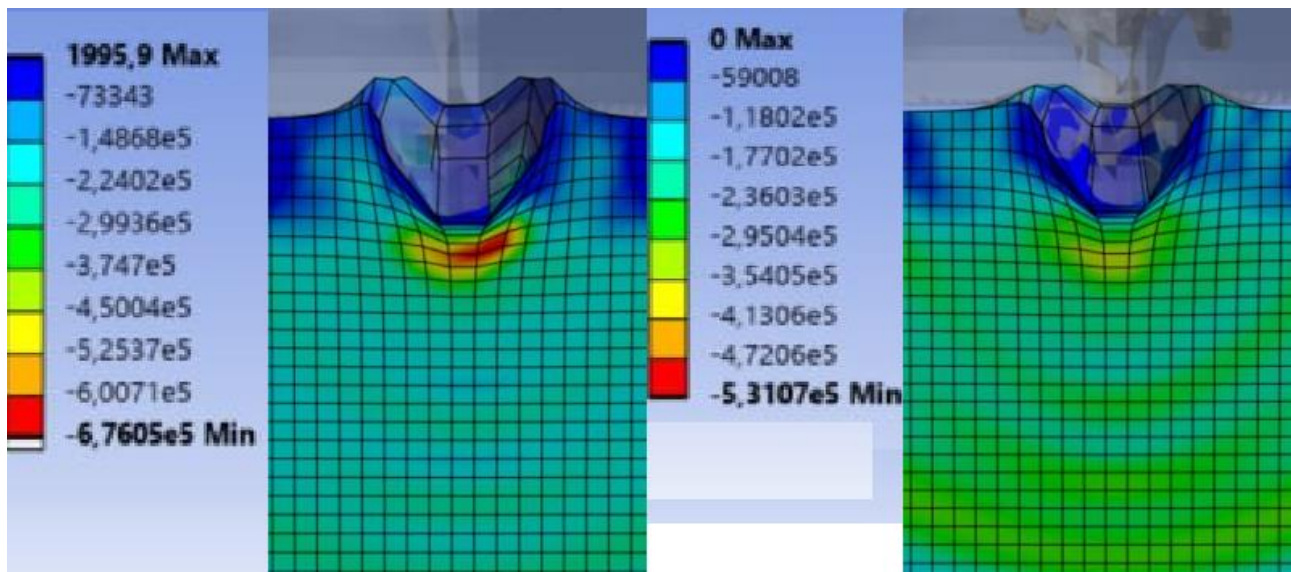


Рис. 3. Максимальні напруження на розтяг а) піщаний масив без плити; в) піщаний масив, накритий бетонною плитою 0,2 метри, система «грунт – бетонна плита»

Максимальні розтягальні напруження, що передаються в ґрунтовий масив без захисної плити, становлять 0,67 МПа, тоді як у разі покриття поверхні бетонною плитою товщиною 0,2 м вони знижуються до 0,37 МПа. З огляду на те, що максимальні напруження в ґрунті приблизно на порядок менші за напруження, які виникають у бетонній конструкції, розташованій у цьому середовищі, можна прогнозувати руйнівні розтягальні напруження на рівні близько 6,7 МПа для випадку відсутності захисної плити (рис. 4).

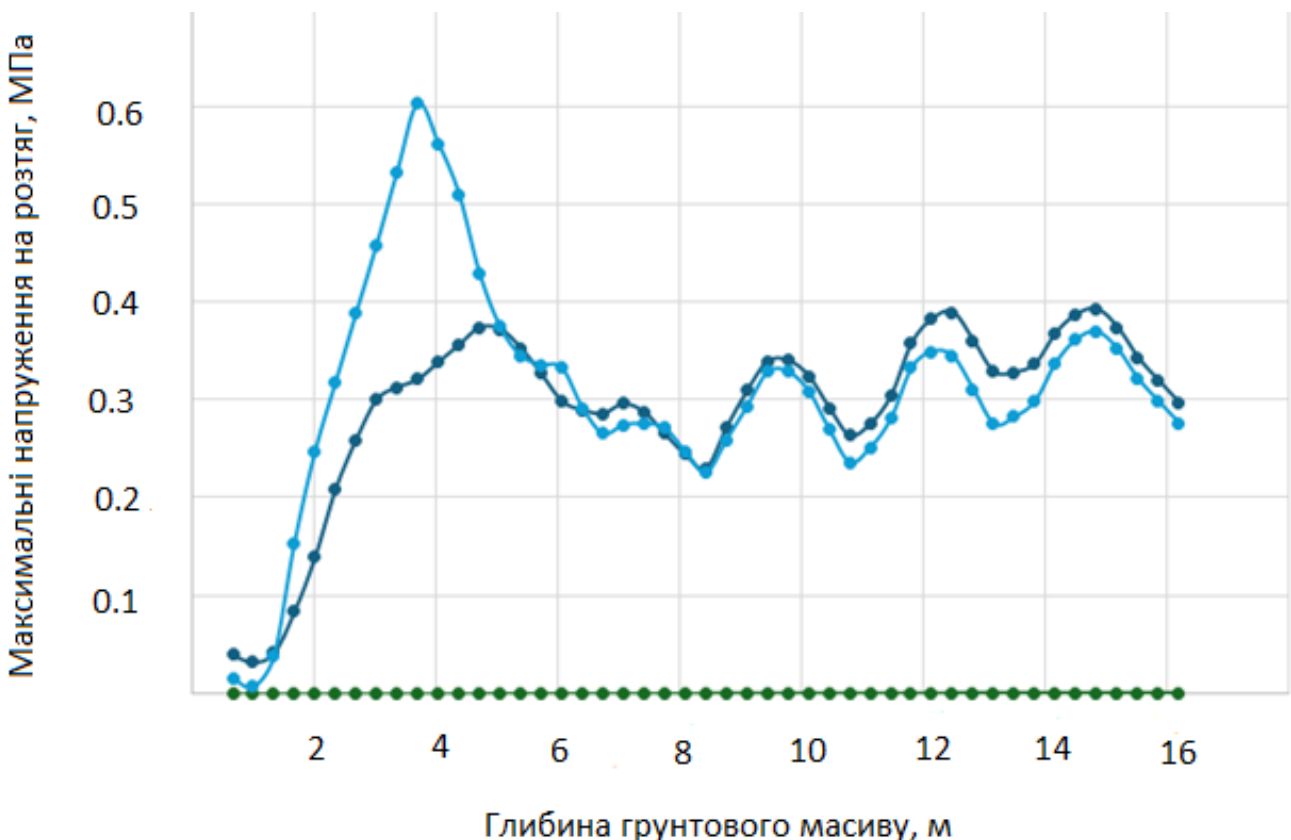


Рис. 4. Розподіл по глибині ґрунтового масиву максимальних напружень на розтяг

Вибух генерує ударну хвилю з надзвичайно високою швидкістю наростання тиску. У разі розміщення підземної бетонної конструкції в ґрунтовому масиві бетон сприймає дію ударної хвилі як короткочасне імпульсне навантаження. У перші мілісекунди матеріал ефективно чинить опір стиску завдяки високій міцності бетону на стиск. Допустимі напруження бетону при стиску є значно вищими (приблизно 10–50 МПа залежно від класу бетону), ніж при розтягу, для якого вони становлять лише 1–5 МПа. Водночас при відбитті ударної хвилі в конструкції виникають розтягальні напруження, до яких бетон є вкрай чутливим, що призводить до формування мікротріщин і локальних відшарувань.

Відповідно до чинних будівельних норм ДБН В.2.6-98:2009 та ДСТУ Б В.2.7-224:2009, орієнтовні допустимі напруження для важкого бетону класів В20–В40 при стиску становлять 20–40 МПа (приблизно 20 МПа для класу В20 та 40 МПа для класу В40), тоді як при розтягу – лише 1,5–3,5 МПа, що у 10–15 разів менше, ніж при стиску [12,13]. Слід зазначити, що наведені значення регламентовані для статичних навантажень, тоді як за умов вибухових або ударних дій допустимі напруження зменшуються внаслідок динамічного характеру процесу руйнування.

**Висновки.** Застосування багатошарових конструктивних рішень у підземних спорудах подвійного призначення суттєво підвищує їхню функціональну надійність, рівень безпеки та адаптивність до дії надзвичайних і воєнних навантажень. Такий підхід забезпечує ефективну інтеграцію цивільних та оборонних функцій в єдину інженерну систему, що відповідає сучасним вимогам урбаністичного розвитку, інженерної безпеки та принципам сталого розвитку міст.

Результати чисельного моделювання підтверджують, що бетонні конструкції демонструють високу ефективність при сприйнятті стискальних напружень, однак є вразливими до дії розтягальних напружень, які виникають унаслідок проходження та відбиття ударних хвиль вибуху. Саме розтягальні напруження та пов'язані з ними процеси відшарування і тріщиноутворення є визначальними механізмами руйнування підземних бетонних елементів за динамічних навантажень.

У цьому контексті застосування залізобетонних та багатошарових конструкцій є значно ефективнішим інженерним рішенням, оскільки арматурний каркас компенсує низьку міцність бетону на розтяг і забезпечує перерозподіл напружень, підвищуючи енергопоглинальну здатність конструкції. Отримані результати мають важливе науково-практичне значення для розробки нових підходів до проектування та модернізації підземної критичної інфраструктури – зокрема укриттів, транспортних тунелів і інженерних споруд – з урахуванням дії вибухових та ударних навантажень у сучасних умовах підвищених безпекових ризиків.

#### Перелік посилань

1. Сахно І.Г., Зуєвська Н.В., Дармостук Д.Г., Семчук Р.І., Зуєвський Ю.В., Сахно С.В. (2025). Забезпечення стійкості об'єктів підземної критичної інфраструктури невеликого заглиблення до ракетних атак. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*, (5), 306–315 <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-35>

2. Zuievskaya, N., Sakhno, I., Darmostuk, D., Berezdetskyi, V., & Zuievskyi, Y. (2024). Applied numerical modeling of ballistic missile–soil interaction using ANSYS explicit dynamics. *Geo-Technical Mechanics*, (171), 190–201. <https://doi.org/10.15407/geotm2024.171.190>
3. Ma, H. J., Quek, S. T., & Ang, K. K. (2004). Soil–structure interaction effect from blast-induced horizontal and vertical ground vibration. *Engineering Structures*, 26(12), 1661–1675. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.01.014>
4. Kuang, J. S., & Tsoi, H. F. (2011). Failure of Blast-Loaded Reinforced Concrete Slabs. *Procedia Engineering*, 14, 2658–2665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.334>
5. Yarushina, V. M., Podladchikov, Y. Y., & Connolly, J. A. D. (2015). (De)compaction of porous viscoelastoplastic media: Solitary porosity waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(7), 4843–4862. Portico. <https://doi.org/10.1002/2014jb011260>
6. Mobaraki, B., & Vaghefi, M. (2024). The Effect of Protective Barriers on the Dynamic Response of Underground Structures. *Buildings*, 14(12), 3764. <https://doi.org/10.3390/buildings14123764>
7. Zhou, H., Ren, H., Yi, Z., Wu, X., Nie, X., & Zhang, H. (2025). Anti-blast performance of multilayer protective structure with different sacrificial claddings. *Engineering Failure Analysis*, 171, 109336. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109336>
8. Genç, O. K., Kong, Z., Keshtegar, B., & Thai, D.-K. (2024). Blast-Resistant Design of Reinforced Concrete Slabs with Auxetic-Shaped Reinforcement Layout. *Buildings*, 14(11), 3392. <https://doi.org/10.3390/buildings14113392>
9. Hao, H., Hao, Y., Li, J., & Chen, W. (2016). Review of the current practices in blast-resistant analysis and design of concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, 19(8), 1193–1223. <https://doi.org/10.1177/1369433216656430>
10. Draganić, H., Jeleč, M., Gazić, G., & Lukić, S. (2025). Numerical investigations of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions. *Buildings*, 15(7), 1063. <https://doi.org/10.3390/buildings15071063>
11. Iannitti, G., Bonora, N., Curiale, G., Muro, S. D., Marfia, S., Ruggiero, A., Sacco, E., Scafati, S., & Testa, G. (2018). Analysis of reinforced concrete slabs under blast loading. *Procedia Structural Integrity*, 9, 272–278. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.035>
12. ДБН В.2.6-98:2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення».
13. ДСТУ Б В.2.7-224:2009 «Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками».

#### ABSTRACT

**Purpose.** Substantiation and development of a comprehensive approach to optimizing the protective properties of structures through the implementation of multilayer systems.

**The methods.** The study is based on the finite element method, implemented using the ANSYS Explicit Dynamics software package, which allows for the modeling of high-speed nonlinear deformation processes. The methodology accounts for soil pore compaction effects, nonlinear compression, and plastic deformation of materials. The use of consistent material models enables the accurate replication of shock wave front propagation, its reflection from interface surfaces, and its subsequent interaction with the structural elements of the facility.

**Findings.** Numerical experiments allowed for a quantitative assessment of the effectiveness of additional protective layers. It was established that the introduction of an intermediate reinforced concrete layer promotes the redistribution of explosion energy and a significant reduction in the amplitude of tensile stresses within the internal structural elements and the surrounding soil. The obtained data confirm that the multilayer structure acts as a damping barrier, reducing stress concentrations in the most vulnerable zones of the underground structure and preventing its progressive collapse.

**The originality.** For the first time, complex dependencies describing the influence of the geometric configuration and physico-mechanical characteristics of the multilayer system's components on the overall stability of the structure have been obtained. The understanding of energy absorption mechanisms in the "reinforced concrete structure – porous soil mass" system under ultra-fast loading conditions has been deepened. The modeling approaches have been improved by accounting for wave interaction effects in heterogeneous media, specifically energy attenuation due to pore air compression and multiple pulse reflections at material boundaries with different acoustic impedances.

**Practical implementation.** The research results have direct application in the engineering field, particularly for the design of new and the modernization of existing civil defense facilities, transport tunnels, and critical infrastructure. The proposed calculation models and established patterns provide a justified basis for selecting the thickness and materials of protective screens, ensuring increased personnel safety and the preservation of material assets. The findings can be integrated into industry standards and methodological recommendations for assessing the stability of underground objects under dynamic impacts.

**Keywords:** *underground structures, blast loading, multilayer structure, reinforced concrete, porous soil, stress-strain state, ANSYS Explicit Dynamics, dynamic stability, shock wave, civil protection.*

дата першого надходження статті до видання	12.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	14.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026