УДК 624.042:614.8:539.37 DOI https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.1.12

Поляков Антон Павлович,

аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва факультету архітектури, будівництва та дизайну, Державний університет «Київський авіаційний інститут», просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1312-8858 E-mail: 4672349@stud.kai.edu.ua

Лапенко Олександр Іванович,

доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва факультету архітектури, будівництва та дизайну, Державний університет «Київський авіаційний інститут», просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2029-0792 E-mail: oleksandr.lapenko@npp.kai.edu.ua

АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ НА ПІДЗЕМНІ СПОРУДИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В ANSYS AUTODYN

Анотація. У статті розглянуто метод забезпечення захисту підземних споруд цивільного захисту від вибухових навантажень, що є одним із ключових завдань сучасної інженерії. Вибухова хвиля, що утворюється під час детонації вибухових речовин, може спричиняти значні напруження або навіть руйнування підземних конструкцій, особливо за умови замалої їхньої міцності чи невдалого розташування. Це підкреслює необхідність застосування ефективних методів захисту й інженерних рішень.

Одним із найбільш перспективних методів мінімізації впливу вибухової хвилі є використання підземних захисних екранів. Особливо ефективні залізобетонні екрани, які здатні частково розсіювати та поглинати енергію вибуху і завдяки цьому зменшувати рівень навантаження на конструкції підземних споруд. Упровадження таких екранів може значно підвищити рівень безпеки підземних об'єктів, що використовуються для захисту населення, військових або стратегічних інфраструктурних споруд.

У роботі виконано чисельне моделювання вибуху тротилового заряду, що детонує над підземним укриттям, за допомогою сучасних засобів комп'ютерного моделювання. Було розглянуто два варіанти моделей: перший передбачав використання захисного залізобетонного екрана між епіцентром вибуху та спорудою, тоді як другий варіант не передбачав наявності екрана. Для проведення розрахунків і аналізу результатів використовувалося програмне забезпечення "ANSYS AUTODYN", яке дає можливість математично відтворювати взаємодію вибухової хвилі з різними середовищами, зокрема і ґрунтом та бетонними перешкодами.

Результати чисельного аналізу показали, що у варіанті із застосуванням екрана значення максимального тиску на підземну споруду виявилося на 5,4% меншим, ніж без використання екрана. Це показує потенціал ефективності залізобетонних захисних конструкцій у зниженні впливу вибухових навантажень, їхню доцільність у проєктуванні споруд цивільного захисту.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень у цій сфері, проведення натурних випробувань, а також розроблення та оптимізації конструктивних рішень, що враховують вихідні параметри, функціональне призначення й габарити підземних споруд. Перспективними напрямами подальших досліджень є вдосконалення конструкцій захисних екранів, аналіз їхньої ефективності в різних типах трунтів і за різних умов вибухових впливів, що дозволить створювати ще більш ефективні засоби захисту.

Ключові слова: підземні споруди цивільного захисту, вибухові хвилі, чисельне моделювання, захисні екрани.

Poliakov Anton, Lapenko Oleksandr. Analysis of numerical modeling of blast wave effects on underground civil protection structures in ANSYS AUTODYN

Abstract. The article discusses the method of ensuring the protection of civil defense underground structures from explosive loads, which is one of the key tasks in modern engineering. The shock wave created during the

detonation of explosives can generate significant stresses or even cause the destruction of underground structures, especially if their strength is insufficient or their location is unfavorable. This emphasizes the need to apply effective protection methods and engineering solutions.

One of the most promising methods for minimizing the impact of the shock wave is the use of underground protective screens. Reinforced concrete screens, in particular, are highly effective in partially dissipating and absorbing the energy of the explosion, thereby reducing the level of loading on the underground structures. The implementation of such screens can significantly enhance the safety of underground facilities used for protecting the population, military, or strategic infrastructure objects.

This study presents a numerical simulation of the detonation of a TNT charge above an underground shelter using modern computer simulation tools. Two model variants were considered: the first involved the use of a protective reinforced concrete screen between the explosion's epicenter and the structure, while the second variant did not include a screen. For the calculations and analysis of the results, ANSYS AUTODYN software was used, which enables the mathematical reproduction of the interaction of the shock wave with various environments, including soil and concrete barriers.

The results of the numerical analysis showed that in the model with the protective screen, the maximum pressure on the underground structure was 5,4% lower than in the case without the screen. This demonstrates the potential effectiveness of reinforced concrete protective structures in reducing the impact of explosive loads and their feasibility in the design of civil defense structures.

The obtained results can serve as the basis for further research in this field, field testing, as well as the development and optimization of structural solutions that take into account the initial parameters, functional purpose, and dimensions of underground facilities. Promising areas for future research include the improvement of protective screen designs, analysis of their effectiveness in different soil types and under varying explosive impact conditions, which will help create even more effective protection systems.

Key words: civil defense underground structures, shock waves, numerical modeling, protective screens.

Вступ. Забезпечення надійності функціонування підземних споруд цивільного захисту та їхні техніко-економічні показники є дуже важливою і актуальною проблемою сучасної інженерії. Це питання є постійно актуальним через постійний розвиток воєнної світової промисловості. В умовах воєнних конфліктів, терористичних загроз, промислових аварій чи природних катаклізмів підземні укриття виконують критично важливу функцію захисту людей, обладнання та критичної інфраструктури від руйнівного впливу вибухових хвиль. Поширення вибухових хвиль у ґрунті може спричинити значні напруження та деформації, що може призвести до пошкодження чи руйнування захисних споруд.

Одним із перспективних і маловивчених методів зменшення впливу вибухових хвиль на підземні споруди є застосування захисних екранів, зокрема залізобетонних. Такі екрани можуть ефективно розсіювати енергію вибуху та зменшувати рівень навантаження на підземні споруди. Тому точні механізми впливу екранів на розподіл напружень у ґрунті та їхня ефективність потребують детального вивчення.

Для чисельного моделювання вибухової хвилі було вибрано ANSYS AUTODYN. Даний програмний комплекс дозволяє змоделювати, обчислити та порівняти результати розрахунків обох моделей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останніми роками питання захисту підземних споруд цивільного захисту від вибухових навантажень стало важливою темою в галузі інженерії та безпеки [1]. Численні дослідження зосереджуються на аналізі вибухових хвиль і методах їх зменшення, особливо через використання захисних екранів [2]. Вибухові хвилі можуть значно пошкоджувати або навіть руйнувати підземні конструкції, що ставить під сумнів їхню ефективність за неналежної міцності або неправильного розташування. У зв'язку із цим багато вчених вказують на необхідність пошуку нових методів для мінімізації таких впливів не тільки для підземних, а й інших типів конструкцій [3].

Дослідження, проведені за допомогою чисельного моделювання, показують високий потенціал застосування залізобетонних захисних екранів для зменшення рівня вибухового навантаження на підземні споруди. Зокрема, чисельні моделі вибухів, що застосовуються у програмному забезпеченні, як-от ANSYS AUTODYN, дозволяють точно змоделювати взаємодію вибухової хвилі з різними середовищами, зокрема ґрунтом і бетонними конструкціями. Ці дослідження підтверджують, що використання захисних екранів може знизити рівень тиску на підземні споруди, що є критично важливим для убезпечення об'єктів цивільного захисту.

Вивчені роботи також акцентують увагу не лише на значенні конструктивних рішень, а й на врахуванні характеристик вибухових навантажень, типу ґрунтів і матеріалів, що використовуються для виготовлення захисних екранів [4–6].

Отже, останні наукові дослідження підтверджують важливість створення захисних конструкцій для підземних споруд, які можуть не лише зменшити вплив вибухових навантажень, а й значно підвищити рівень безпеки в разі надзвичайних ситуацій. Подальші роботи в цій галузі мають зосередитися на вдосконаленні матеріалів для захисних екранів і розробленні оптимальних конструкцій, що враховують специфіку вибухових навантажень та геологічні умови.

Матеріали та методи. Чисельне моделювання поверхневого вибуху тротилового заряду над підземним укриттям виконано в ANSYS AUTODYN. Процес моделювання проходив у кілька етапів: визначення оптимальної геометрії моделі для поставленого завдання, задання фізичних властивостей матеріалів, побудова сітки, вибір відповідних моделей матеріалів і взаємодій, а також проведення аналізу отриманих результатів. Для моделювання було вибрано такі дві моделі (рис. 1).

1. Побудова геометричної моделі

Модель містила основні матеріали, узяті з бібліотеки матеріалів ANSYS Engineering Data:

Вибуховий заряд (далі – TNT) – тротиловий заряд розміщено на поверхні ґрунту. Еквівалент вибуху становив 1 кг ТНТ.

Грунтовий масив – представлено областю грунту, де розташована підземна споруда. Матеріал даного масиву був заданий як SAND (пісок).

Підземне укриття – залізобетонна конструкція, задана як CONC-35MPa.

Захисний екран – залізобетонна плита завтовшки 200 мм, розташована між епіцентром вибуху та підземною спорудою, задана як CONC-35MPa.

Повітря – середовище над поверхнею землі, задане з характеристиками атмосферного повітря Air (Atmospheric).

2. Визначення фізичних і механічних характеристик матеріалів

Для кожного матеріалу було вибрано відповідні моделі:

TNT – модель *Jones – Wilkins – Lee* (далі – JWL) для опису детонаційного процесу [7].



Модель без захисного екрана Модель із захисним екраном Рис. 1. Геометрична модель конструкції

Грунт – модель *Drucker – Prager* для опису його пластичної поведінки [8].

Залізобетон – модель *Riedel – Hiermaier – Тhoma* (далі – RHT) для бетонних конструкцій [9–11].

Повітря – модель ідеального газу *Ideal Gas EOS* для врахування розповсюдження вибухової хвилі. Значення атмосферного тиску становить 98 kPa [12].

Дискретизація (створення сітки)

Використано Eulerian-сітку для ТНТ, повітря та піску.

Lagrangian-сітка застосована для підземної споруди та захисного екрана.

Для коректного врахування взаємодії між різними середовищами використано метод гладких частинок (далі – SPH) у критичних зонах.

4. Визначення граничних умов

Постановка моделі є плоскою 2D осесиметричною щодо осі X (див. рис. 1.1). Дане рішення ухвалене з міркувань підвищення деталізації моделі та водночас не збільшення тривалості розрахунків.

Розмір домену взятий 3 500 х 3 000 мм. Розмір чарунки сітки розбиття елементів становить 25 мм. Розмір чарунки Eulerian-сітки – 25 мм.

Грунтовий масив є основним середовищем, через яке поширюється вибухова хвиля. Для уникнення відбиття хвиль від країв моделі, що могло б призвести до некоректних результатів, було застосовано такі умови: нижня, верхня та бічна (ліва) границі домену – Flow Out.

Для більш точного моделювання процесу контактних взаємодій між ґрунтом, спорудою і екраном ураховане тертя та зчеплення.

Кінцевий час розрахунку становить 65 мс.

5. Параметри розрахунку

Для оптимального розрахунку були вибрані такі параметри:

1) для розрахунку моделі:

- Minimum timestep 0.000000 мс;
- Maximum timestep 1.000000e + 08 мс;
- Safety factor 0.66;
- 2) вихідних результатів розрахунків:
- Increment 0.001 мс;
- Display freq. 10;
- Text freq. -1.

Взаємодія між поверхнями Euler/Lagrange Розрахункова модель в ANSYS AUTODYN – див. рис. 2, 3. Схема задана як переріз за вертикаллю ґрунтового масиву, який складається з піску (SAND), екранай елементу підземного укриття (CONC-35MPa), атмосферного повітря (AIR), вибухівки ТНТ (TNT).



Рис. 2. Розрахункова модель із захисним екраном



Рис. 3. Розрахункова модель без захисного екрана

6. Запуск моделювання і аналіз результатів Перед початком розрахунків була проведена верифікація всіх параметрів моделі, зокрема: перевірка коректності взаємодії матеріалів;

 контроль початкових умов (правильне розташування вибухового заряду, відповідні значення густини, швидкості детонації та енергії вибуху);

– перевірка стабільності сітки (чи немає надто дрібних або надто великих елементів, що можуть спричинити помилки чисельного інтегрування). У нашому випадку Eulerianсітка і Mash мали однакову величину у 25 мм.

Після цього було виконано розрахунок.

Для проведення аналізу обчислення результати були взяті в точці G. Розміщення точки G – див. рис. 1. Після розрахунку отримано такі графіки результатів тиску в часі (рис. 4, 5). **Результати.** Після виконання чисельного моделювання і розрахунків впливу вибухової хвилі були отримані такі результати.

Максимальне значення тиску від вибухової хвилі, яка не проходила через захисний екран, — 390 kPa. Максимальне значення тиску від хвилі, яка проходила через захисний екран, становило 411 kPa. Виходячи з результатів, застосування захисного екрана зменшило максимальне значення тиску на 5,4%. Також результати показали, що початок зростання тиску для моделі з екраном відбувається раніше, ніж для моделі без екрана, та має меншу інтенсивність розвитку динамічної хвилі та більш плавну динаміку навантаження. Результати розрахунків (рис. 6) із тривалістю розрахунку 65 мс показали, що



Рис. 4. Графік напруження в точці G у моделі із захисним екраном



Рис. 5. Графік напруження в точці G у моделі без захисного екрана



Рис. 6. Графік напруження в точці G у моделі без захисного екрана із тривалістю розрахунку 65 мс

значення тиску в часі має характер коливань, який спадає до 20 мс, після чого вони знову відновлюються і знову спадають. Ці перепади відбуваються в межах 98 kPa. Це значення атмосферного тиску повітря, яке задано в моделі. Це свідчить про нестабільність розрахункової моделі. Однією із причин може бути витік газу через граничні обмеження домену Flow out і неврахування початкового впливу атмосферного тиску на ґрунтовий масив SAND.

Висновки. Згідно з результатами чисельного моделювання впливу вибухової хвилі на підземну споруду цивільного захисту отримано такі висновки щодо чисельного моделювання та потенційної ефективності використання захисного екрану. Моделювання показало, що максимальний показник тиску для моделі із захисним екраном на 5,4% менший ніж без нього. Це підтверджує потенційну ефективність застосування даних конструкцій під час будівництва захисних споруд цивільного захисту. Також потрібно зазначити, що потенційна ефективність цих екранів полягає в тому, що їх можна робити із простих збірних залізобетонних елементів конструкції, які можна швидко монтувати під час будівництва. Також воні прості у виконанні та дозволяють захищати підземні конструкції, які мають більш складну архітектурну й інженерну конфігурацію.

Аналіз графіка напруження в точці G (рис. 4, 5) показав в першому варіанті нижчу інтенсивність розвитку динамічного навантаження, ніж у другому, це свідчить про позитивний ефект екрана у стабілізації процесу впливу вибухової хвилі.

Окрім того, результати із тривалістю 65 мс (рис. 6) показали нестабільність математичної моделі із тривалими розрахунками для короткотривалих процесів.

Рекомендації. Подальше вдосконалення моделі. Для отримання більш точних резуль-

татів потрібно вдосконалити граничні умови моделювання, зокрема з'ясувати та вирішити потенційні проблеми. Це дозволить зменшити нестабільність розрахункової моделі.

Оптимізація конструкції захисного екрана. Подальші дослідження варто спрямувати на оптимізацію геометрії та матеріалів захисного екрана для підвищення ефективності зниження вибухового навантаження.

Експериментальна верифікація результатів. Для отримання більш надійних і застосовуваних у реальних умовах результатів необхідно провести натурні випробування. Це дозволить верифікувати результати та порівняти їх із фактичними значеннями тиску, його впливом на підземні конструкції та ефективністю захисних екранів.

Розширення моделювання на різні типи підземних споруд. Необхідно провести моделювання для різних типів підземних споруд цивільного захисту (наприклад, укриттів, бомбосховищ, тунелів), щоб оцінити, як конструкція укриття впливає на ефективність захисних екранів. Це дозволить урахувати різноманітність архітектурних рішень і підвищити універсальність результатів дослідження.

Урахування реальних властивостей грунтових масивів. Подальші дослідження мають передбачати більш точне моделювання грунтових масивів, з урахуванням їхньої неоднорідності та різних типів грунтів, грунтових вод тощо. Це дозволить створити більш точні моделі для різних географічних умов і типів споруд.

Аналіз впливу вибухових хвиль різної потужності та розміщення епіцентру. Рекомендується виконати додаткове моделювання для оцінювання впливу, що дозволить адаптувати конструкції до різних сценаріїв реального використання та забезпечити більшу гнучкість у застосуванні.

Список використаних джерел:

1. Коваль М.В., Коваль В.В., Білик А.С., Коцюруба В.І., Кубраков О.М. Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника : монографія / за ред. А.С. Білика. Київ: Генеральний штаб ЗСУ, 2023. 185 с. С. 6–8.

2. European Commission. Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen. Resistance of structures to explosion effects : Review report of testing methods / C. Kevin, Ans van Doormaal, Christof Haberacker, Götz Hüsken, Martin Larcher, Arja Saarenheimo, George Solomos, Alexander Stolz, Laurent Thamie, Georgios Valsamos. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 78 pp. DOI: 10.2788/57271. P. 3.

3. Mobaraki B., Vaghefi M. The effect of protective barriers on the dynamic response of underground structures. *Buildings*. 2024. № 14. 3764 p. P. 1–16. DOI: 10.3390/buildings14123764.

4. Wang I.-T. Nonlinear dynamic response and deformation analysis of soil under the explosion shock loading. *Journal of Vibration and Control*. 2020. Vol. 26. Issue 5–6. P. 1107–1116. URL: https://doi. org/10.21595/jve.2020.21306.

5. Лучко І.А. Результати моделювання дії вибуху на викид сферичних зарядів в однорідних слабозв'язаних грунтах. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Серія «Гірництво». 1999. Вип. 2. С. 14–16.

6. Ремез Н.С. Взаємодія вибухових хвиль із ґрунтами й елементами техноурбоекосистем : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019.

7. Lee E.L., Finger M., Collins S.A. JWL Equations of State Coeffs. for High Explosives. UCID-16189. January 1973.

8. Laine L., Sandvik A. Derivation of mechanical properties for sand. 4th SILOS. CI-Premier LTD. P. 361–367.

9. Riedel W. et al. Penetration of Reinforced Concrete. ISIEMS'99. P. 315.

10. Riedel W. Beton unter dynamischen Lasten Meso- und Makromechanische Modelle und ihre Parameter. Forschungsergebnisse aus der Kurzzeitdynamik, Heft 4. Stuttgart : IRB-Verlag, 2004.

11. Riedel W. et al. Numerical Assessment for Impact Strength. International Journal of Impact Engineering. 2009. Vol. 36. P. 283.

12. Rogers G.F.C., Mayhew Y.R. Thermodynamic and Transport Properties of Fluids, SI Units. 4th ed. London : Blackwell Science, 2000. 392 p.

References:

1. Koval, M.V., Koval, V.V., Bilyk, A.S., Kotsiuruba, V.I., & Kubrakov, O.M. (2023). Osnovy inzhenernoho zakhystu ob'yektiv krytychnoyi infrastruktury enerhetychnoyi haluzi Ukrayiny vid zasobiv povitryanoho napadu protyvnyka: monohrafiya [Fundamentals of engineering protection of critical infrastructure objects in Ukraine's energy sector from enemy air attack means: monograph]. (A.S. Bilyk, Ed.). Kyiv: General Staff of the Armed Forces of Ukraine, pp. 6–8 [in Ukrainian].

2. European Commission. Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen (2013). *Resistance of structures to explosion effects: Review report of testing methods* (C. Kevin, A. van Doormaal, C. Haberacker, G. Hüsken, M. Larcher, A. Saarenheimo, G. Solomos, A. Stolz, L. Thamie, G. Valsamos, Eds.). Luxembourg: Publications Office of the European Union. EUR 26449 EN. Retrieved from https://doi.org/10.2788/57271, p. 3 [in English].

3. Mobaraki, B., & Vaghefi, M. (2024). The effect of protective barriers on the dynamic response of underground structures. *Buildings*, *14* (3764), pp. 1–16. Retrieved from https://doi.org/10.3390/build-ings14123764 [in English].

4. Wang, I.-T. (2020). Nonlinear dynamic response and deformation analysis of soil under the explosion shock loading. *Journal of Vibration and Control, 26* (5–6), 1107–1116. Retrieved from <u>https://doi.org/10.21595/jve.2020.21306</u> [in English].

5. Luchko, I.A. (1999). Rezul'taty modelyuvannya diyi vybukhu na vykyd sferychnykh zaryadiv v odnoridnykh slabozv'yazanykh hruntakh [Results of modeling the explosion effect on the ejection of spherical charges in homogeneous loosely bound soils]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny "KPI" – Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series "Mining"*, 2, 14–16 [in Ukrainian].

6. Remez, N.S. (2019). Vzayemodiya vybukhovykh khvyl' z gruntamy i elementamy tekhnourboekosystem [Interaction of shock waves with soils and elements of techno-urban ecosystems]: Monograph. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky [in Ukrainian].

7. Lee, E.L., Finger, M., & Collins, S.A. (1973). JWL equations of state coefficients for high explosives (UCID-16189). January 1973 [in English].

8. Laine, L., & Sandvik, A. (2004). Derivation of mechanical properties for sand. In *Proceedings of the 4th SILOS Conference* (p. 361–367). CI-Premier LTD [in English].

9. Riedel, W., et al. (1999). Penetration of reinforced concrete. *Proceedings of ISIEMS'99*, 315 [in English].

10. Riedel, W. (2004). *Beton unter dynamischen Lasten* (Fraunhofer EMI, Ed.). Stuttgart: IRB-Verlag [in English].

11. Riedel, W., et al. (2009). Numerical assessment for impact strength. *International Journal of Impact Engineering*, *36*, 283 [in English].

12. Rogers, G.F.C., & Mayhew, Y.R. (2000). *Thermodynamic and transport properties of fluids, SI units* (4th ed.). London: Blackwell Science. 392 p. [in English].