

Оцінка впливу імпульсного навантаження спричиненого вибухом та ударом на заглиблені захисні споруди та ґрунтове середовище

Віктор НОСЕНКО¹, Дмитро НЕЧИПОРЕНКО²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

¹v.s.nosenko@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8261-1846

²dimanechiporenko072@gmail.com, orcid.org/ 0009-0006-6697-2381

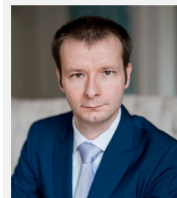
DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.200-209

Анотація. Розрахунок заглиблених у ґрунтове середовище захисних споруд на дію імпульсного навантаження викликаного вибухом або ударом є комплексною проблемою, яка вимагає знання сучасного фізико-математичного апарату опису швидкоплинних процесів деформування різних за міцністю та жорсткістю матеріалів. Для розв'язання задач такого типу сьогодні найчастіше використовують числове моделювання і його результати залежать від коректності створення розрахункової моделі, вибору методу побудови та роботи сітки скінченних елементів, вибору моделей поведінки матеріалів та їх параметрів для ґрунту, бетону, сталевих арматур, що дозволяють описати поведінку споруди та ґрунтового середовища при швидкоплинних і великих деформаціях, а також враховують зміну параметрів матеріалів при імпульсному (короткочасному) впливі у порівнянні з статичними (довготривалими) навантаженнями.

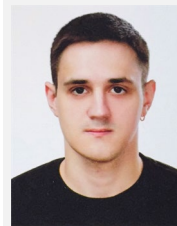
В роботі представлені результати оцінки впливу вибуху та удару на заглиблену у ґрунт захисну споруду виконані у програмному комплексі Ansys/LS-Dyna. Споруда, що аналізувалась є модульною конструкцією яка складається з двох крупнорозмірних залізобетонних елементів, занурена в ґрунтове середовище, в якості якого обраний піщаний ґрунт.

При створенні розрахункової моделі заглиблена споруда моделювалась сіткою Лагранжа, а ґрунт, повітря, простір навколо заглибленої споруди та зона вибуху за допомогою сітки Ейлера. Такий підхід дає змогу використати переваги обох методів.

Розрахунки на дію впливу вибухової ударної хвилі спричиненої вибухівкою масою 50 кг у тротиловому еквіваленті проводилися для трьох



Віктор НОСЕНКО
завідувач кафедри геотехніки
к.т.н., доцент



Дмитро НЕЧИПОРЕНКО
аспірант кафедри геотехніки

варіантів заглиблення споруди: обсіпка ґрунтом товщиною 0,5 м; заглиблення в ґрунт на 1,0 м та на 1,5 м. Досліджено, що збільшення глибини занурення споруди з 0,5 м до 1 м зменшує тиск, що виникає на поверхні споруди в 20 разів, її переміщення зменшуються в 4 рази, напруження в арматурі зменшуються на 68% та значно менше розміри зони пластичних деформацій.

При дослідженні впливу від удару снаряду масою 200 кг, що рухається зі швидкістю 50 м/с під кутом 60° до поверхні ґрунту споруда занурювалась на глибину 0,1 м та 0,5 м. Встановлено, що збільшення глибини занурення споруди знижує ступінь пошкодження заглибленої споруди, кількість пошкоджених ударом зон при збільшенні з 0,1 м до 0,5 м зменшується на 80% тобто ґрунтовий прошарок товщиною 0,5 м добре виконує демпфуючу функцію.

Ключові слова. Числове моделювання, Ansys/LS-Dyna, заглиблена споруда, ґрунтове середовище, вибух, удар.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При проектуванні захисних споруд підземного та надземного типу виникає багато питань пов'язаних з їх розрахунком із використанням адекватного режиму прикладання імпульсного навантаження від вибуху або удару. Ці процеси є швидкоплинними коли час дії близький до 0,1-0,2с і процеси впливу супроводжуються великими деформаціями як самої конструкції так і ґрунтового середовища з яким взаємодіє споруда. Тому постає питання вибору методу моделювання та моделей поведінки матеріалів. Сьогодні найчастіше для розрахунку таких споруд та оцінки впливів на них вибухів та ударів використовують числове моделювання, тому перший крок це вибір адекватної розрахункової моделі та методу розрахунку. Використання спрощених розрахункових підходів в яких до споруд прикладають еквівалентне квазістатичне навантаження дає консервативну оцінку роботи споруди та не дозволяє оцінити зміну її напружено-деформованого стану в часі. Використання спрощених псевдодинамічних підходів типу спектрального аналізу не дозволяє оцінити взаємодію заглиблених споруд з ґрунтовим середовищем, тому найбільш адекватним для таких задач є використання прямого інтегрування в часі і крок інтегрування близький 0,001с.

При використанні методу скінченних елементів окремим питанням є вибір методу побудови сітки скінченних елементів та її розмірів, назви цих методів наведені нижче:

1. Сітка Лагранжа.
2. Сітка Ейлера.
3. Довільний Лагранжа-Ейлера/Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE).
4. Гідродинаміка гладких частинок*/Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

* - авторським переклад з метою адаптації назви методу українською мовою.

Кожен з методів має свої переваги та недоліки. Сітка Лагранжа дозволяє легко відстежувати межу між матеріалами різних конструкцій, як до початку розрахунку так і після та не вимагає багато часу на обчислення, проте вона не є практичною у випадках

значних деформацій моделі із швидкими змінами у часі.

Методи Ейлера та довільний Лагранжа-Ейлера дозволяють моделювати задачі в яких відбувається велике спотворення моделі, наприклад підземний або підводний вибух, а їх недоліком є розмір розрахункової області, значна трудомісткість при налаштування моделі.

Гідродинаміка плавних частинок це безсітковий метод Лагранжа. Його перевагою також є можливість працювати з великими деформаціями моделі, а недоліком трудомісткість та час. Всі ці методи побудови числової моделі доступні в програмному комплексі Ansys/LS-Dyna.

При розв'язку таких задач ґрунт доцільніше моделювати сіткою Ейлера або SPH, оскільки під впливом вибухової ударної хвилі він веде себе нестабільно і дуже сильно деформується, але якщо зона дослідження знаходиться достатньо далеко від епіцентру вибуху то можна поєднувати між собою сітки Лагранжа та Ейлера або Лагранжа та SPH.

Моделювання вибух також можливе у декілька способів: спеціальною командою, що задає функцію дії вибуху в часі або ж фізично змоделювати вибухівку з її вагою та зміною об'єму внаслідок ініціації вибуху. При використанні другого підходу необхідно задати матеріал відповідної вибухової речовини, а також використовувати рівняння стану Jones-Wilkins-Lee (JWL) (LS-Dyna, 2025) для опису її поведінки.

Захисна споруда та всі її елементи зазвичай моделюються сіткою Лагранжа.

Важливим є питання вибору моделей матеріалів і їх параметрів, оскільки в задачах такого типу всі впливи протікають швидко в часі і мають динамічний характер. Необхідно обирати моделі, що дозволяють описати поведінку матеріалу саме при швидкому деформуванні. Окремим питанням є вибір коректного критерію руйнування, адже поведінка матеріалу при статичному навантаженні і динамічному може значно відрізнятися між собою.

При вирішенні задач пов'язаних з імпульсними навантаженнями для підвищення

точності та розуміння процесів якими супроводжується вибух або механічний удар важливими є натурний експеримент впливу вибуху або удару на конструкцію. Він дає змогу виконати верифікацію отриманих даних числового моделювання та створити модель, яка буде давати результати максимально наближені до реально отриманих під час експерименту.

Методи моделювання ґрунтів при великих деформаціях розглянуто в праці (Bojanowski C., & Kulak R. F. 2010). Порівняння різних підходів при моделюванні вибуху продемонстровано в роботах (Bojanowski C. and Kulak R. F. 2012); (Barsotti, M. et. al 2016); (Schwer L. 2010); (Slavik T. P. 2010). Поведінка піщаного ґрунту під дією динамічного навантаження описана в роботі (Nazhat, Y. N. Y. 2013). Дія впливу вибухового навантаження на заглиблені споруди розглянута в працях (Jayasinghe L. B. et. al 2013); Koneshwaran S. 2014), а моделювання ударних навантажень у (Van Dorselaer, N. et. al 2012); (Sangi, A. J. and May I. M. 2009).

МЕТА РОБОТИ

Оцінка впливу вибуху та удару снаряду на заглиблену в ґрунтове середовище захисну споруду.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження впливу вибуху та удару прийнята заглиблена захисна споруда, що має габарити: $4,9 \times 2,45 \times 2,795$ м. показано на Рис.1.

Нижня частини – залізобетонні стіни товщиною 200 мм та підлога 150 мм, бетон класу С30/35, арматура класу А500С по ДСТУ 3760:2019 кроком 100 мм.

Покриття – збірний залізобетонний елемент, який складається з оболонки товщиною 200 мм, бетон класу С30/35, арматура класу А500С по ДСТУ 3760:2019 кроком 100 мм. Ґрунтовим середовищем в яке занурена споруда є піщаний ґрунт, з такими параметрами: щільність – 1750 кг/м^3 , модуль

зсуву – 60 МПа та модуль об'ємного розв'язання – 130 МПа.

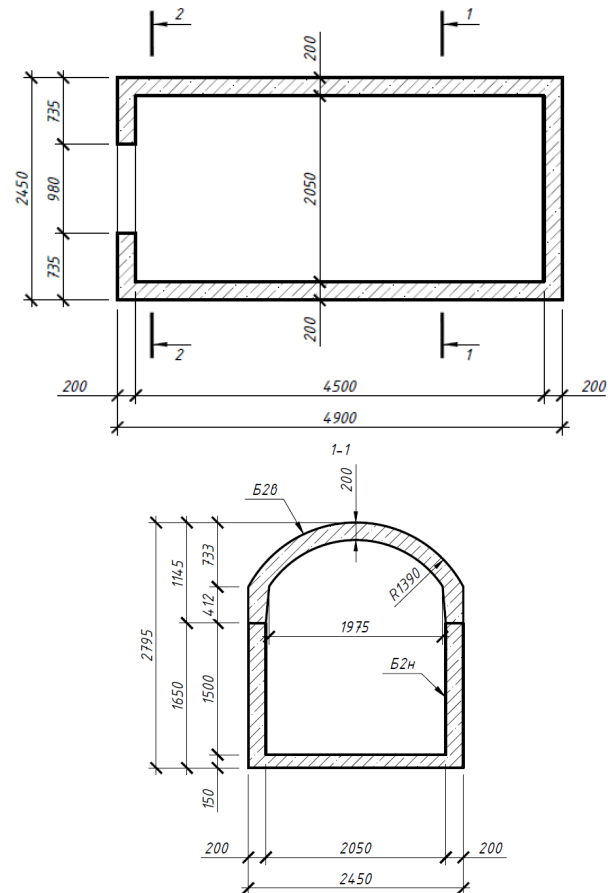


Рис.1. Схема захисної споруди.

Fig.1. Scheme of protective structure.

Також для цього ґрунту додатково використана залежність об'ємної деформації від тиску, яка була прийнята з роботи (Nazhat, Y. N. Y., 2013). Розглянуто три варіанти заглиблення споруди у ґрунт: 1) обсіпка ґрунтом товщину 0,5 м; 2) заглиблення в ґрунт на глибину 1,0 м; 3) заглиблення в ґрунт на глибину 1,5 м показано на Рис. 2.

Кількість вибухової речовини в дослідженні відповідає 50 кг у тротиловому еквіваленті. Вибух ініціювався безпосередньо на поверхні ґрунту.

Розрахунки виконувались в програмному комплексі ANSYS/LS-Dyna. З метою оптимізації часу використовувалась симетрична частина споруди та ґрунтового масиву. На площині симетрії (ZOX) встановлені обмеження для переміщення у перпендикулярному напрямку. На нижній та бічних гранях ґрунтового масиву накладені спеціальні граничні умови *boundary tom reflecting*, що не

віддзеркалюють хвилі викликані вибухом (LS-Dyna, 2025).

При створенні розрахункової моделі застосовувався підхід Лагранжа-Ейлера. Це дало змогу отримати перевагу кожного з методів. Повітря, ґрунт, вибух та простір навколо захисної споруди моделювалися сіткою Ейлера, захисна споруда сіткою Лагранжа. Окремо балочними елементами моделювалась дискретна арматура захисної споруди, а за допомогою пластин – закладні деталі (Рис. 2б). Об'єднання арматури і закладних деталей з бетоном забезпечується *constrained lagrange in solid* (LS-Dyna, 2025) з налаштуваннями за замовчуванням. Щоб досягти спільної роботи між сітками Ейлера та Лагранжа використовувалась аналогічна команда.

Взаємодія між верхньою та нижньою частинами споруди задавалась командою, що дозволяє створити контактні інтерфейси на

межі дотику *contact automatic surface to surface* (LS-Dyna, 2025).

Ґрунт моделювався за допомогою моделі матеріалу *soil and foam* (LS-Dyna, 2025). Для бетону використовувалася модель матеріалу *cscm concrete* (LS-Dyna, 2025), яка дозволяє описати його поведінку маючи обмежену кількість вихідних даних. В розрахунку використані наступні параметри: щільність – 2500 кг/м^3 , міцність на стиск – 35 МПа, розмір заповнювача 1,5 см. Критерій руйнування для даної моделі залежить від рівня пошкодження елемента, а також максимальної головної деформації. Для сталі застосовувалася модель матеріалу *plastic kinematic* (LS-Dyna, 2025). Матеріал *null* разом з рівнянням стану *linear polynomial* (LS-Dyna, 2025) описують повітря навколишнього середовища, а *vacuum* простір навколо споруди. *High explosion burn* і рівняння стану JWL моделювали вибухівку (LS-Dyna, 2025).

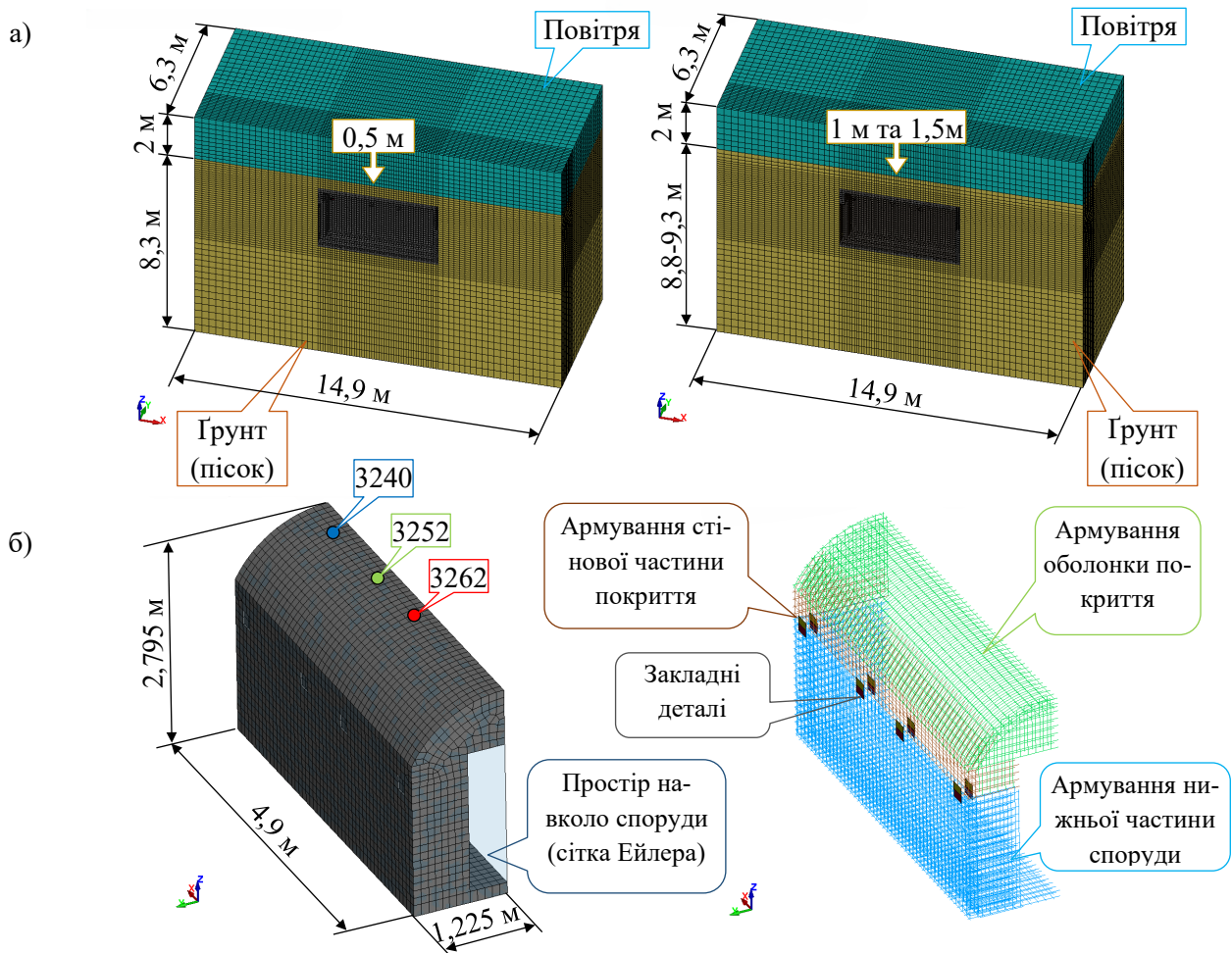


Рис.2. Скінчено-елементна модель захисної споруди та схема її армування.

Fig.2. Finite element model of the protective structure and reinforcement.

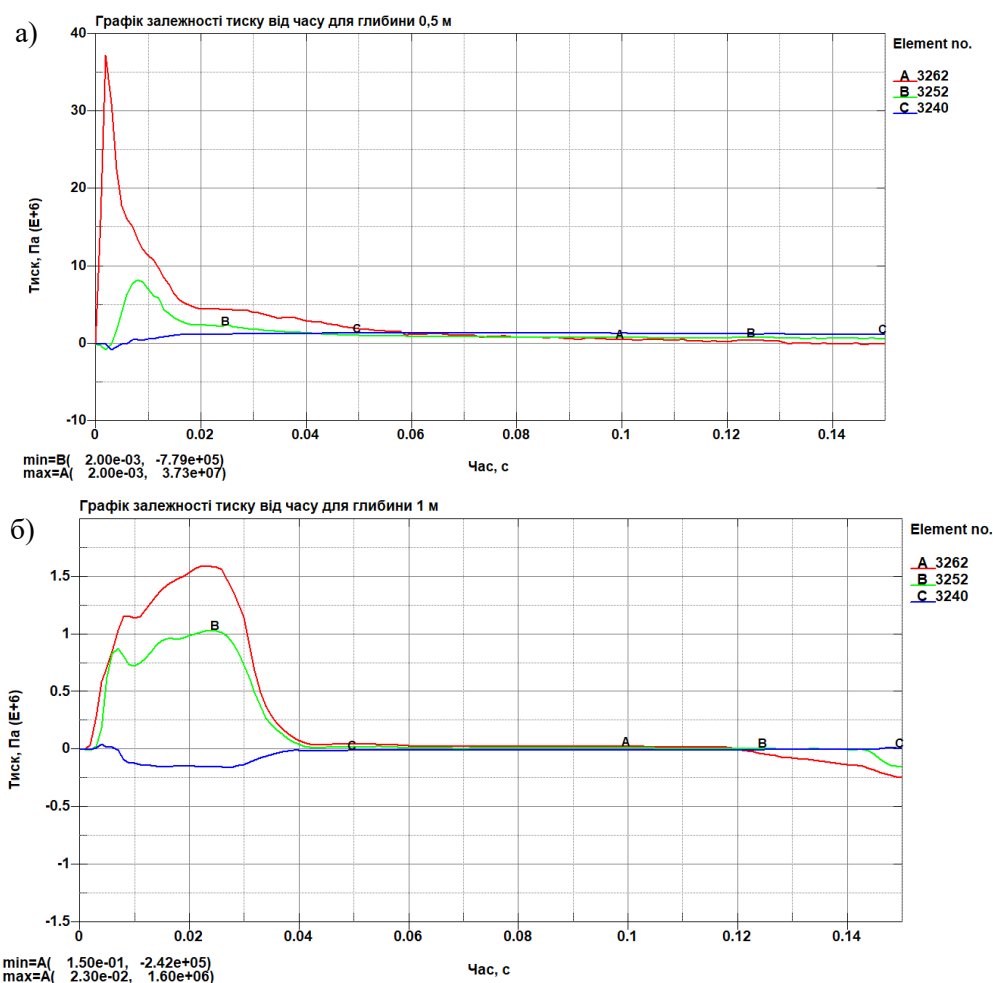


Рис.3. Графіки залежності тиску від часу на поверхні споруди: а) 0,5 м; б) 1 м
Fig.3. Graphs of pressure versus time on the structure's surface: a) 0,5 m; b) 1 m

На Рис. 2б позначено елементи, у верхній частині захисної споруди, в яких вимірювався тиск спричинений вибухом, колір позначених елементів відповідає кольору кривих як показано на графіках Рис. 3.

Згідно отриманих графіків на рис. 3 встановлено, що збільшення глибини з 0,5 м (тиск становить 37,3 МПа) до 1 м (тиск становить 1,6 МПа) зменшує тиск від вибуху на поверхні споруди в 23 рази. Подальше заглиблення в ґрунт не мало значного впливу.

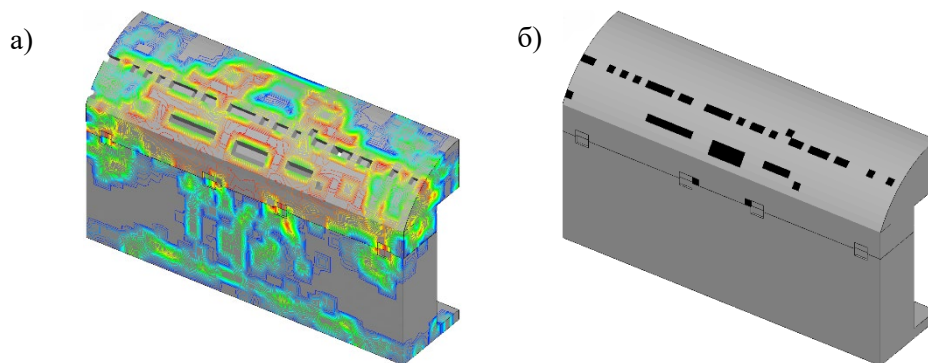


Рис.4. Розподіл на глибині 0,5 м: а) пластичних деформацій; б) зон з пошкодженнями в конструкції укриття.

Fig.4. Distribution at a depth of 0,5 m: a) plastic deformations; b) damage zones in the shelter structure.

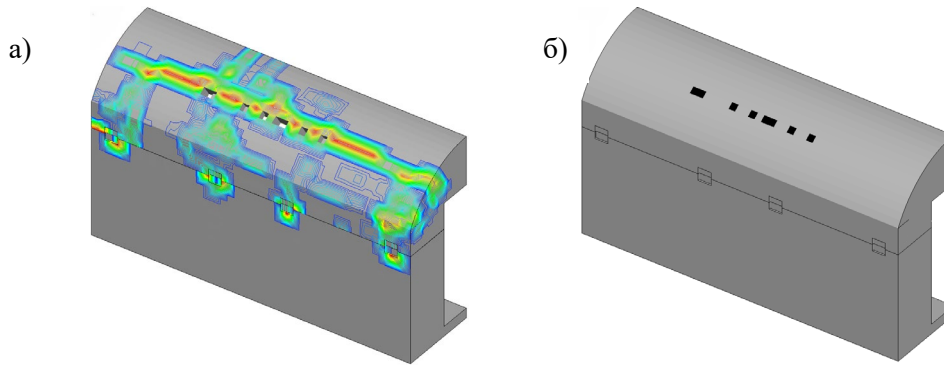


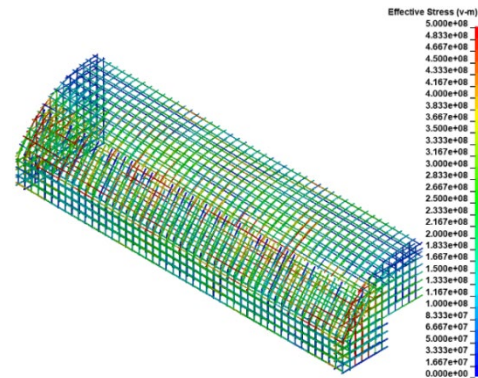
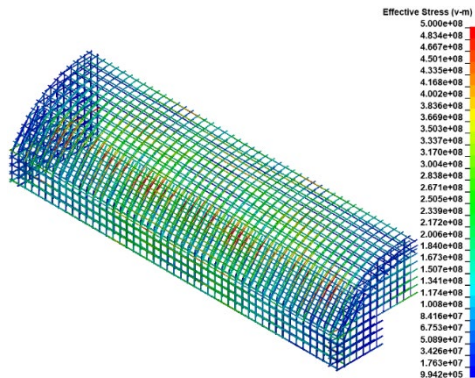
Рис.5. Розподіл на глибині 1 м: а) пластичних деформацій; б) зон з пошкодженнями в конструкції укриття.

Fig.5. Distribution at a depth of 1 m: a) plastic deformations; b) damage zones in the shelter structure.

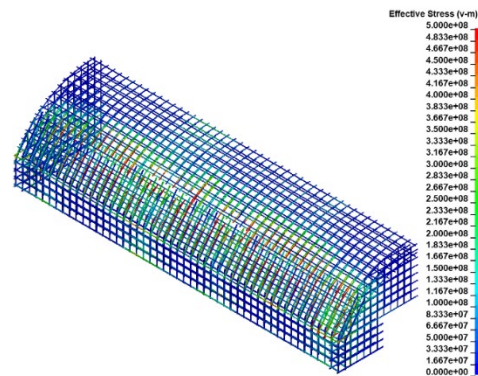
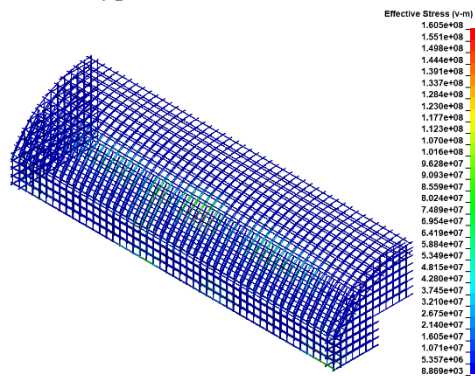
Зони з пластичними деформаціями покривають майже всю поверхню споруди на глибині 0,5 м, а при 1 м присутні лише у

На Рис.6 продемонстровано, що на глибині 0,5 м на 0,1 с впливу напруження в арматурі вже досягають максимальних

Глибина занурення 0,5 м



Глибина занурення 1 м



0,1 с

0,5 с

Рис.6. Ізополя напружень в арматурі верхньої частини укриття.

Fig.6. Stress contour maps in the reinforcement of the upper part of the shelter.

верхній частині. Кількість видалених елементів з розрахунку зменшилось на 53%, глибина 0,5 м – 236 шт., глибина 1 м – 110 шт.

значень 500 МПа, при зануренні на глибину 1 м в той самий проміжок часу вони зменшуються на 68% і складають 160,5 МПа.

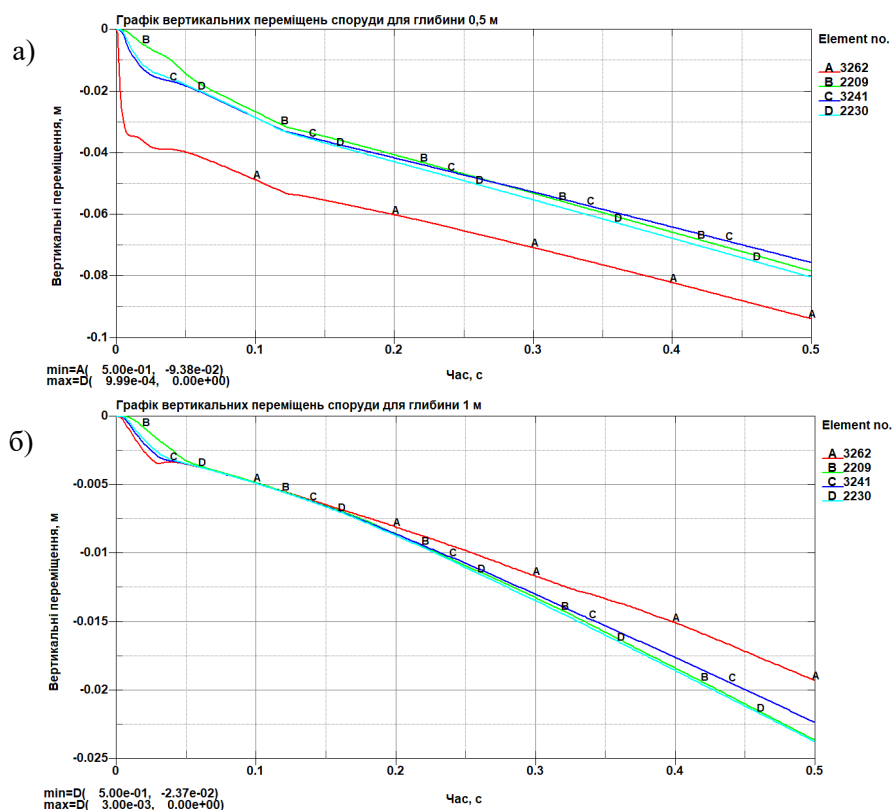


Рис.7. Графік переміщення споруди: а) 0,5 м; б) 1 м.

Fig.7. Displacement graph of the structure: a) 0,5 m; b) 1 m.

З графіків Рис. 7 можна встановити, що вертикальні переміщення споруди зі збільшенням глибини її занурення у ґрунт на 0,5 м зменшуються в 4 рази. При глибині занурення 0,5 м максимальне переміщення дорівнює – 9,4 см, при 1 м – 2,4 см.

Також розглянуто вплив удару на заглиблену споруду, що імітує влучання снаряду

масою 200 кг зі швидкістю 50 м/с під кутом 60° до поверхні землі. Аналізувались споруди занурені на глибину 0,1 м та 0,5 м.

Параметри моделі та матеріалів брались аналогічні до тих, що були використані в задачах розглянутих вище.

Снаряд моделювався як жорстке тіло.

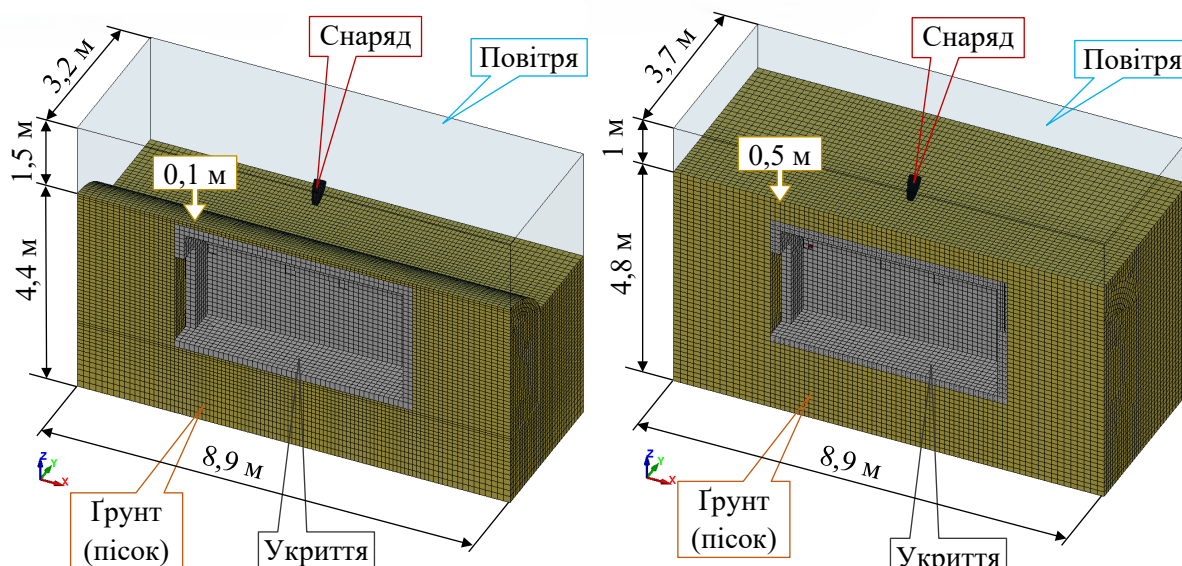


Рис.8. Скінчено-елементна модель для аналізу впливу дії удару при влучанні снаряду.

Fig.8. Finite element model for analyzing the impact of a projectile strike.

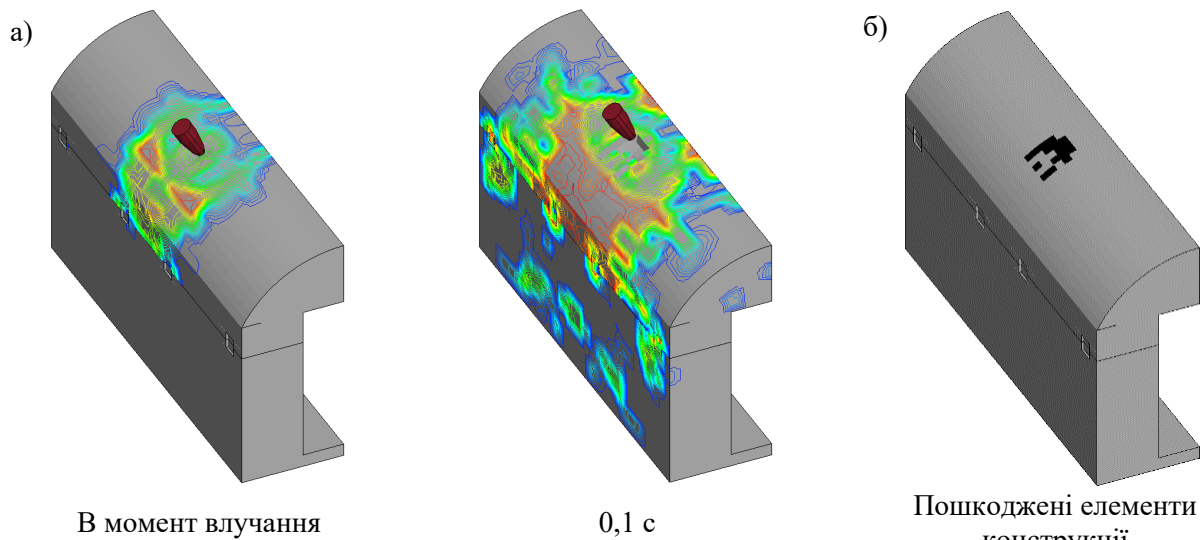


Рис.9. Розподіл на глибині 0,1 м: а) пластичних деформацій в елементах укриття в результаті удару; б) зон з пошкодженими елементами.

Fig.9. Distribution at a depth of 0,1 m: a) plastic deformations in the shelter elements as a result of the impact; b) zones with damaged components.

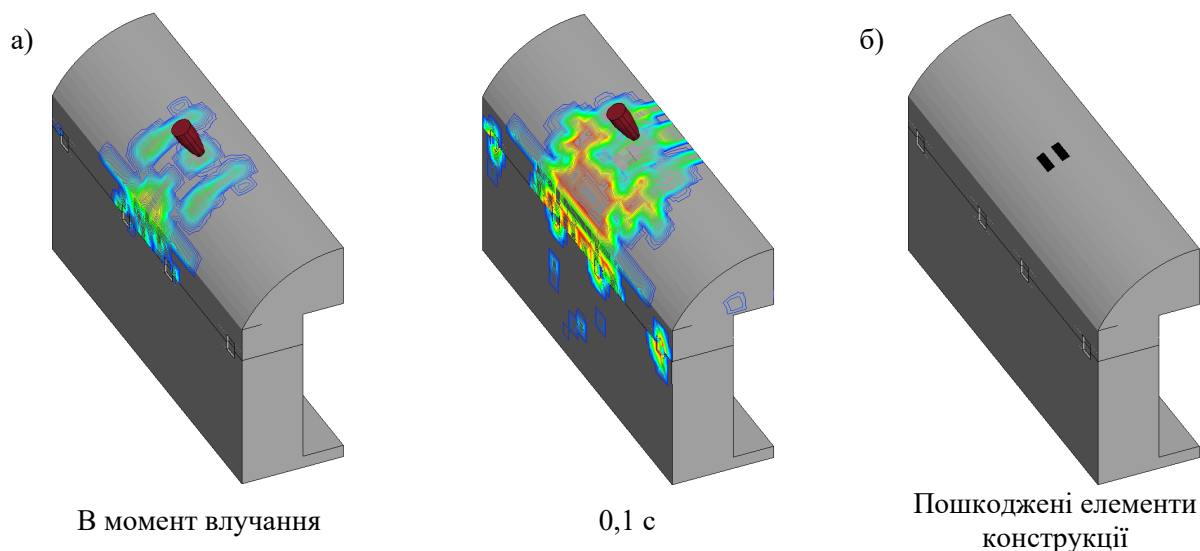


Рис.10. Розподіл на глибині 0,5 м: а) пластичних деформацій в елементах укриття в результаті удару; б) зон з пошкодженими елементами.

Fig.10. Distribution at a depth of 0,5 m: a) plastic deformations in the shelter elements as a result of the impact; b) zones with damaged components.

З отриманих результатів продемонстрованих на Рис. 9, 10 можна зробити висновок, що при ударних навантаженнях незначне збільшення глибини, а саме з 0,1 до 0,5м, може суттєво вплинути на зменшення зон пошкодження споруди в результаті влучання снаряду. Зони пластичних деформацій зменшуються, як і пошкодження самої споруди. Кількість зон пошкодження прогнозованих розрахунком зменшилась на

79% і становить: для 0,1 м – 29 шт.; для 0,5 м – 6 шт.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Показано, що для моделювання ґрунтового середовища при впливі на нього вибуху або удару слід використовувати сітку Ейлера, оскільки вона дозволяє відтворювати великі деформації викликані даними впливами. Захисну споруду та її елементи

доцільно моделювати сіткою Лагранжа, деформації споруди значно менші в порівнянні з тими які виникають в ґрунтовому масиві.

Продемонстровано, що обрана для опису поведінки ґрунту модель матеріалу *soil and foam* з бази ANSYS/LS-Dyna може бути застосована для опису поведінки ґрунтів при динамічних впливах. Модель матеріалу для бетону *cscm concrete* з бази ANSYS/LS-Dyna дозволяє з мінімальною кількістю вихідних даних задовільно відтворити напружено-деформований стан бетону при вибухових та ударних впливах, а модель матеріалу *plastic kinematic* дає можливість моделювати пластичне і кінематичне зміцнення сталі.

Встановлено, що збільшення глибини занурення споруди у ґрунт з 0,5 м до 1 м при дії впливу вибухової речовини масою 50 кг в тротиловому еквіваленті розміщеної на поверхні ґрунту має суттєвий позитивний вплив: тиск на поверхні споруди від дії вибуху зменшується в 23 рази, переміщення конструкції споруди зменшуються в 4 рази, а напруження в арматурі зменшуються на 68%. При заглибленні споруди на 0,5 м зони пластичних деформацій в залізобетонній конструкції покривають майже всю поверхню споруди, а при заглибленні у ґрунт на 1 м з'являються лише у її верхній частині споруди, площа зон з пошкоджень зменшується на 53%. Подальше збільшення глибини не дало суттєвих змін.

Досліджено вплив від удару снаряду масою 200 кг, що рухається зі швидкістю 50 м/с під кутом 60° до поверхні землі та встановлено, що збільшення глибини занурення споруди з 0,1 м до 0,5 м значно впливає на ступінь її пошкодження в результаті удару, кількість пошкоджених зон на поверхні споруди зменшується на 79%.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Bojanowski, C., & Kulak, R. F. (2010, June). Comparison of lagrangian, SPH and MM-ALE approaches for modeling large deformations in

- soil. In 11th International LS-DYNA® Users Conference, Dearborn, MI, pp11-45 to (pp. 11-55).
2. Tabatabaei, Z. S., & Volz, J. S. (2012, June). A comparison between three different blast methods in LS-DYNA: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. In *12th International LS-DYNA Users Conference* (Vol. 3, pp. 1-10).
3. Barsotti, M., Sammarco, E., & Stevens, D. (2016). Comparison of strategies for landmine modelling in LS-DYNA with sandy soil material model development. In *Proceedings of 14th international LS-DYNA users conference, June* (pp. 12-14).
4. Schwer, L. (2010, October). A brief introduction to coupling load blast enhanced with Multi-Material ALE: the best of both worlds for air blast simulation. In *German LS-DYNA Forum* (Vol. 2, No. 3, pp. 205-11).
5. Slavik, T. P. (2010, June). A coupling of empirical explosive blast loads to ALE air domains in LS-DYNA®. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 10, No. 1, p. 012146). IOP Publishing.
6. Nazhat, Y. N. Y. (2013). Behaviour of sandy soil subjected to dynamic loading.
7. Jayasinghe, L. B., Thambiratnam, D. P., Perera, N., & Jayasooriya, J. H. A. R. (2013). Computer simulation of underground blast response of pile in saturated soil. *Computers and Structures*, 120, 86-95.
8. Koneshwaran, S. (2014). *Blast response and sensitivity analysis of segmental tunnel* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
9. Van Dorsselaer, N., Lapoujade, V., Nahas, G., Tarallo, F., & Rambach, J. M. (2012, June). General Approach for Concrete Modeling: Impact on Reinforced Concrete. In 12th International LS-DYNA® Users Conference, Dearborn.
10. Sangi, A. J., & May, I. M. (2009, May). High-mass, low-velocity impacts on reinforced concrete slabs. In *7th European LS-DYNA conference*.
11. LS-DYNA, Livermore software technology cooperation, LS-DYNA keyword user's manual, 2025.
12. LS-DYNA, Livermore software technology cooperation, LS-DYNA material models manual, 2025.

Assessment of the impact of impulse loading caused by explosion and impact on underground protective structures and soil

*Viktor NOSENKO,
Dmytro NECHYPORENKO*

Summary. The calculation of protective structures embedded in soil media under the action of impulse loading caused by an explosion or impact is a complex problem that requires knowledge of modern physical and mathematical tools for describing transient deformation processes in materials with varying strength and stiffness. To solve such problems, numerical modeling is most commonly used today. The accuracy of the results depends on the correctness of the computational model, the choice of mesh generation method and finite element mesh operation, as well as the selection of material behavior models and their parameters for soil, concrete, and steel reinforcement. These models must accurately describe the behavior of the structure and surrounding soil under transient and large deformations and account for the changes in material properties under impulse (short-term) loading compared to static (long-term) loads.

This study presents the results of an assessment of the effects of explosion and impact on a buried protective structure using the Ansys/LS-Dyna software suite. The analyzed structure is a modular construction consisting of two large-sized reinforced concrete elements, embedded in a soil environment modeled as sandy soil.

In the creation of the computational model, the buried structure was modeled using a Lagrangian mesh, while the soil, air, space around the structure, and the explosion zone were modeled using an Eulerian mesh. This hybrid approach allows for the benefits of both methods to be utilized.

The simulations of explosive impact caused by a 50 kg TNT-equivalent charge were conducted for three burial depth scenarios: soil backfill of 0.5 m; burial depths of 1.0 m and 1.5 m. It was found that increasing the burial depth from 0.5 m to 1.0 m reduces the pressure on the structure's surface by a factor of 20, reduces displacements by a factor of 4, decreases reinforcement stress by 68%, and significantly reduces the size of the plastic deformation zone.

In the study of impact effects from a 200 kg projectile traveling at 50 m/s at a 60° angle to the soil surface, the structure was buried at depths of 0.1 m and 0.5 m. It was determined that increasing the burial depth significantly reduces the extent of damage to the buried structure: the number of damaged

zones decreased by 80% when the burial depth increased from 0.1 m to 0.5 m. This indicates that a 0.5 m thick soil layer effectively performs a damping function.

Keywords. Numerical modeling, Ansys/LS-Dyna, buried structure, soil medium, explosion, impact