

Числове моделювання дії удару та вибуху на елементи системи «основа - захисна споруда»

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: 10.32347/0475-1132.51.2025.91-98

Анотація. Проектування надійних захисних споруд або окремих елементів їх конструкцій потребує комплексного аналізу зміни напружено-деформованого стану їх елементів як системи «основа – захисна споруда» під дією різних за характером впливів. Необхідно враховувати багато вхідних параметрів, які безпосередньо впливають на результати розрахунків.

В роботі продемонстровані результати числового моделювання оцінки впливу влучання снаряду масою 300 кг зі швидкістю 60 м/с у фрагмент стіни захисної споруди, кут атаки, якого змінювався відносно горизонталі і мав наступні значення: 0°, 15°, 45°, 60°. Також аналізувався вплив від детонації бойової частини з вагою вибухової речовини близької до 100 кг у тротиловому еквіваленті. Для виконання розрахунків використовувався програмний комплекс Ansys/LS-Dyna.

Фрагмент стіни має товщину 1200 мм, а основою для неї слугують фундаменти неглибокого закладання. Армується стіна в чотири шари стержнями різного діаметру та перемінним кроком. Покриття захисної споруди являє собою багатошарову залізобетонну плиту, яка виконується по металевим балкам.

При створенні числової моделі системи «основа – захисна споруда» використовувався метод Лагранжа. Геометрія стіни, покриття, фундаменту і ґрунту зроблена за допомогою твердих об'ємних елементів, а дискретне армування залізобетонних конструкцій балочними елементами. Для моделювання впливу вибуху застосовувався підхід Лагранжа-Ейлера. Вибухівка задавалась фізично, а її поведінка описувалась рівнянням стану.



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



Дмитро НЕЧИПОРЕНКО
аспірант кафедри
геотехніки

В результаті дослідження впливу удару на фрагмент стіни захисної споруди було встановлено, що зміна кута атаки снаряду має суттєвий вплив на рівень та форму пошкоджень захисної конструкції. Різниця між площами зон пошкоджень для кутів 0° та 60° доходить до 70%, а розбіжності в значеннях напружень, що виникають в армуванні складає 20% та 73% для зовнішньої та внутрішньої граней стіни відповідно.

Продемонстровано пошкодження стіни захисної споруди від дії впливу вибуху. На зовнішній стороні вони є розподіленими, а на внутрішній зосереджені в центрі. Площа зони пластичних деформацій на 41% для зовнішньої та 18 % для внутрішньої граней більша від зони викликаной ударом снаряду із кутом атаки 0°. Напруження в армуванні досягають граничних значень – 500 МПа. При комбінації впливів, дія вибуху має набагато більший ефект на стіну захисної споруди, кут атаки впливає не суттєво.

Ключові слова. Захисна споруда, числове моделювання, удар, вибух, Ansys/LS-Dyna.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час проектування та розрахунку захисних споруд для елементів об'єктів критичної інфраструктури виникає багато питань, що пов'язані з вибором надійного та економічно ефективного проектного рішення конструкцій захисних споруд. Для виконання розрахунку інженер має враховувати багато факторів, серед них основними є: інтенсивність дії вибухового та ударного навантажень, які по своєму характеру є короткочасними високоенергетичними імпульсами, реальні параметри оточуючого середовища і матеріалів захисних конструкцій. При оцінці впливу удару важливими вхідними параметрами є: вага снаряду, кут його атаки і швидкість руху, а для оцінки впливу вибухової ударної хвилі – маса вибухової речовини, відстань від епіцентру вибуху до споруди і середовище в якому розповсюджується вибухова ударна хвиля.

Для комплексної оцінки дії таких впливів сьогодні використовують натурні експерименти, які є унікальними, що в свою чергу робить їх достатньо дорогими або числове моделювання напружено-деформованого стану (НДС) елементів системи “основа – захисна споруда” із застосуванням програмних комплексів, що здатні виконувати розрахунки динамічних впливів із прямим інтегруванням рівнянь руху в часі і мають необхідні моделі поведінки матеріалів у своїй бібліотеці. В даному дослідженні використаний програмний комплекс Ansys/LS-Dyna, який є одним із світових лідерів для вирішення задач даного типу.

МЕТА РОБОТИ

Оцінка впливу удару снаряду, при зміні кута його атаки, та подальшої детонації бойової частини на НДС елементів системи «основа – захисна споруда», несучу здатність споруди та її надійність.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі досліджувався фрагмент стіни

захисної споруди товщиною 1200 мм, що спирається на фундаменти неглибокого закладання. Армування виконано в чотири шари сітками із арматури різного діаметру класу А500С, встановлених із перемінним кроком, а основним матеріалом стіни є бетон класу С32/40.

Конструкція покриття захисної споруди – це багатошарова залізобетонна плита із бетону класу С32/40, що влаштовується по системі сталевих балок.

Для оцінки впливу удару (Van Dorsselaer, N. et. al 2012); (Han, X. M. 2019) на стіну захисної споруди моделювався снаряд вагою близько 300 кг, діаметр якого не перевищував 250 мм, а швидкість руху, в момент влучання, становила близько 60 м/с. В дослідженні розглянуто декілька варіантів кута атаки снаряду під якими він влучав у стіну: 0°, 15°, 45°, 60°.

Також досліджувався вплив вибуху на поверхні стіни, одночасно з яким відбувалось влучання снаряду. Такий підхід імітує детонацію бойової частини при влучанні.

Для створення розрахункової моделі був використаний метод Лагранжа. Стіна, фундаменти, покриття та ґрунт моделювалися твердими об'ємними елементами (Schmied, C., & Erhart, T. 2018), а армування конструкцій задавалось дискретними балочними елементами. Модель матеріалу для опису поведінки сталі описана в (LS-Dyna, 2025), для бетону розглянуто в роботі (LS-Dyna, 2025); (Murray, Y. D. 2007). Сумісна робота арматури та бетону була забезпечена командою *constrained lagrange in solid*. Максимально наближений до регулярного крок сітки 0.1 мм. Загальний час тривалості розрахунку становив 0.1 с.

При створенні моделі для дослідження впливу вибуху використаний підхід Лагранжа-Ейлера. Вибухівка вагою близько 100 кг моделювалась сіткою Ейлера, для опису її поведінки застосовувалось рівняння стану (Schwer, L. et. al 2015); (Huang, Y. et. al 2012). Снаряд моделювався як жорстке тіло.

Скінчено-елементна модель системи “основа – захисна споруда” наведена на Рис. 1.

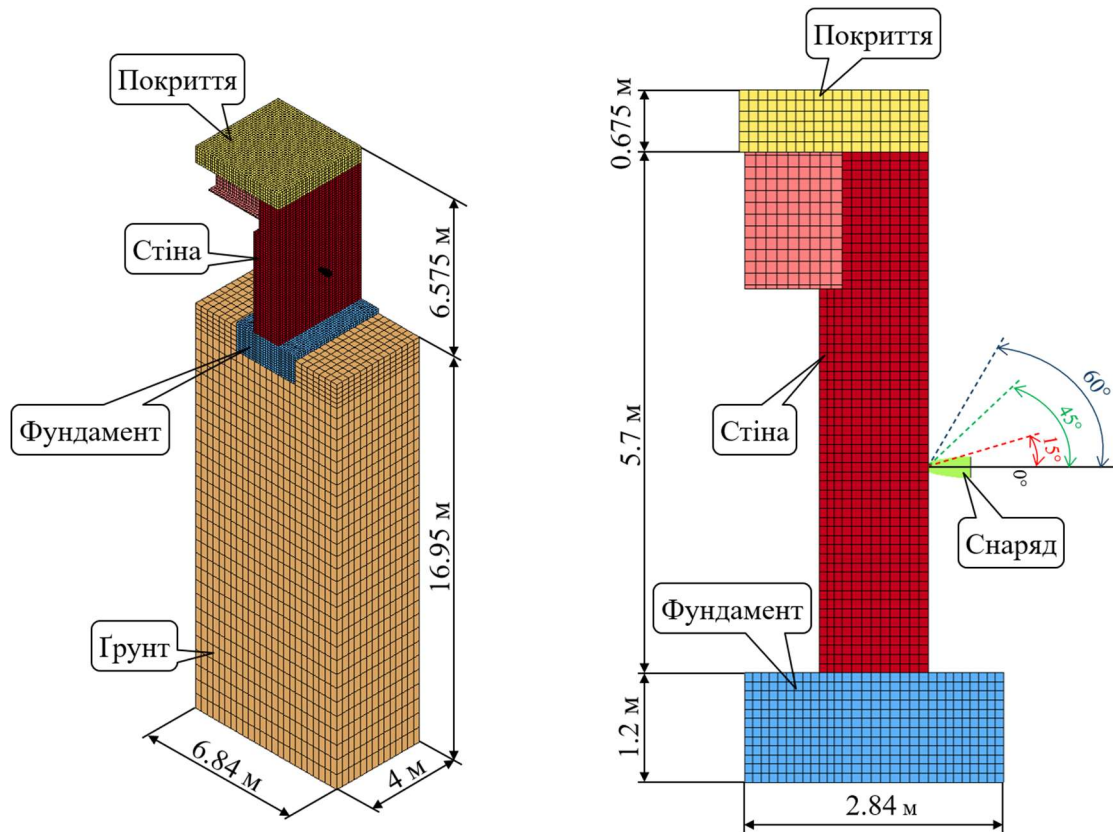


Рис.1. Скінчено-елементна модель фрагменту системи: «основа-захисна споруда».
Fig.1. Finite element model of a fragment of the “foundation–protective structure” system.

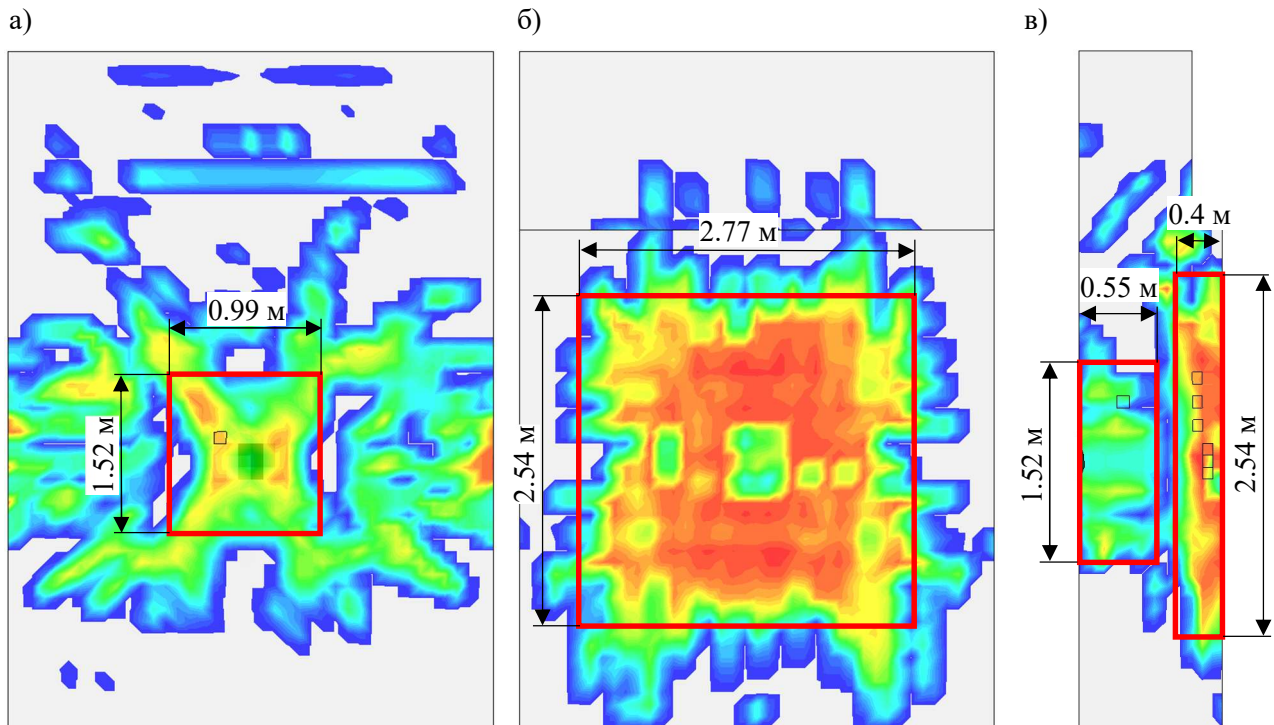


Рис.2. Пластичні деформації стіни в результаті удару при куті атаки 0°: а) фасад; б) внутрішня сторона; в) розріз.
Fig.2. Plastic deformations of the wall resulting from impact at an attack angle of 0°: a) facade; b) inside; c) section.

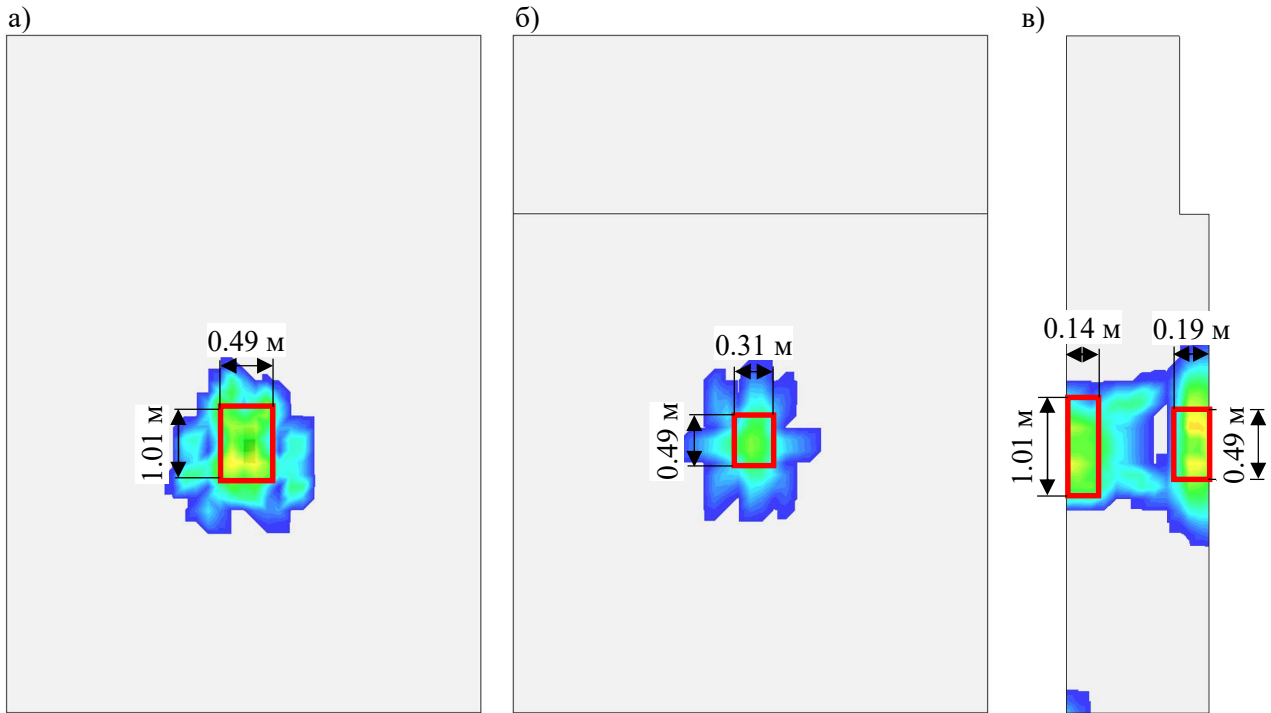


Рис.3. Пластичні деформації стіни в результаті удару при куті атаки 60° : а) фасад; б) внутрішня сторона; в) розріз.

Fig.3. Plastic deformations of the wall resulting from impact at an attack angle of 60° : a) facade; b) inside; c) section.

На Рис. 2 та Рис. 3 зображено результати впливу від удару снаряду, що мав кути атаки 0° та 60° до горизонталі відповідно.

При влучанні в стіну снаряду під кутом 0° з'являються великі за площею зони пластичних деформацій, як на фасадній (площа 1.5 м^2) так і внутрішній (площа 7.0 м^2) гранях стіни. Пошкодження яке виникає в результаті удару, перпендикулярного до поверхні стіни, можна назвати розтріскуванням із середини, тобто пошкоджень зазнає фасад стіни, а також виникає відшарування матеріалу на внутрішній стороні. Аналогічний ефект спостерігається при влучанні снаряду, що має кут атаки 15° , але площа зон пластичних деформацій для фасаду зменшується на 35% (площа 0.97 м^2), а для внутрішньої сторони на 45% (площа 3.9 м^2).

Влучання снаряду під кутом 60° до горизонталі майже не спричиняє пошкоджень стіни. З'являється невелика локальна зона пластичних деформацій на фасаді площею 0.49 м^2 , що на 67% менша ніж була при куті атаки 0° , яку можна назвати вищербленням на лицьовій стороні. В цьому місці прогнозується поява невеликих тріщини. На

внутрішній грані стіни пластичні деформації до кінця розрахунку зникають зовсім і мають ще менші розміри (площа 0.15 м^2). Влучання снаряду в стіну під кутом 45° спричиняє аналогічні наслідки, проте площа пошкоджень на фасаді є більшою на 14% і складає 0.57 м^2 , на внутрішній стороні пластичні деформації зникають, а площа зони де вони з'являються, в момент удару, дорівнює 0.75 м^2 .

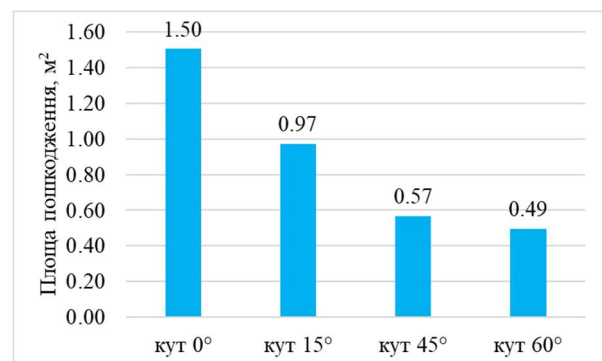


Рис.4. Зміна площі пошкодження стіни захисної споруди від зміни кута атаки снаряду.

Fig.4. Variation of the damage area of the protective structure wall with the change in projectile attack angle

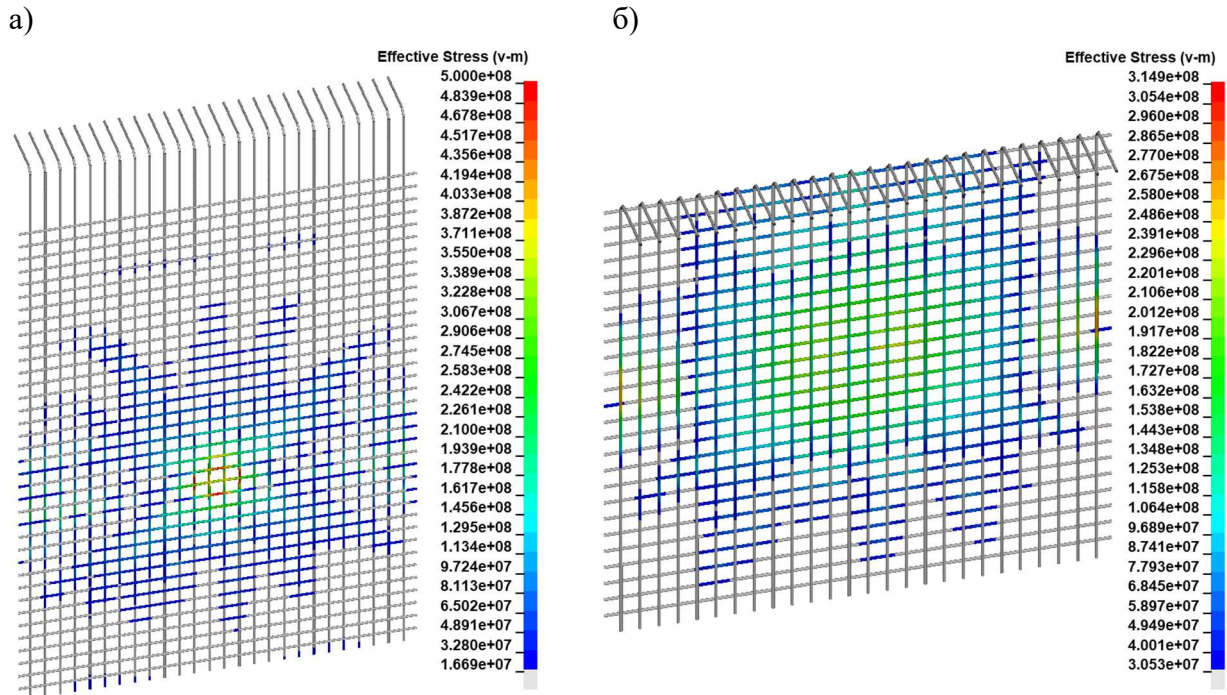


Рис.5. Ізополя напружень арматури стіни при куті атаки снаряду 0° : а) зовнішня грань; в) внутрішня грань.

Fig.5. Isostress fields of the wall reinforcement at a projectile attack angle of 0° : a) outer face; b) inside.

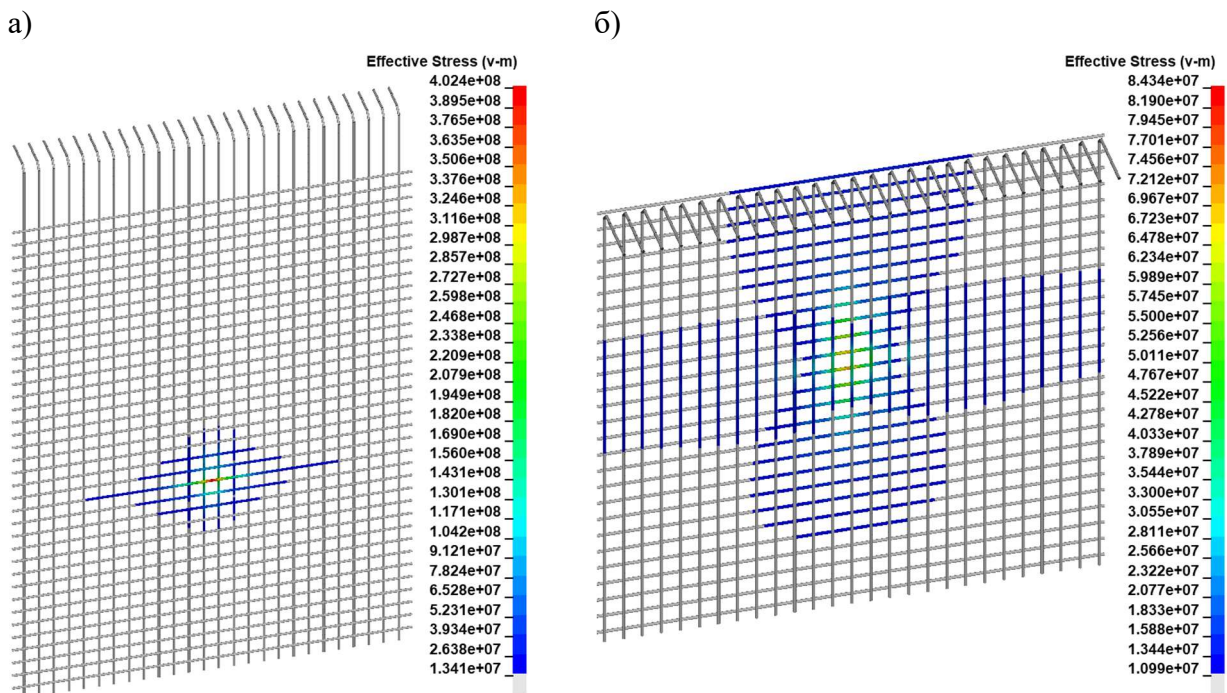


Рис.6. Ізополя напружень арматури стіни при куті атаки снаряду 60° : а) зовнішня грань; в) внутрішня грань.

Fig.6. Isostress fields of the wall reinforcement at a projectile attack angle of 60° : a) outer face; b) inside.

Згідно отриманих результатів в арматурі, що розташована біля зовнішньої грані стіни, яка приймає удар, при влучанні снаряду під кутом 0° відбувається локальний розрив

стержнів у першому, найближчому до зони удару, шарі армування, а в другому шарі Рис. 5а – напруження досягають своїх граничних значень і складають 500 МПа. Біля

внутрішньої грані Рис. 5б максимальні напруження складають 315 МПа.

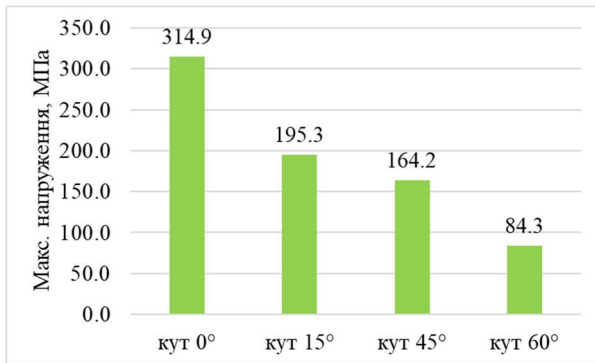


Рис.7. Максимальні напруження в арматурі біля внутрішньої грані стіни при різному куті атаки.

Fig.7. Maximum stresses in the reinforcement near the inner face of the wall at different attack angles.

При куті атаки снаряду 60° у першому шарі армування також можливий локальний розрив стержнів, а в другому Рис. 6а – напруження складають 402.4 МПа, що на 20% менше за значення отримані для кута 0°. Максимальне значення напружень біля внутрішньої грані, для кута атаки 60°, зменшуються на 97% і складають 84 МПа Рис. 6б.

Для кутів 15° та 45° напруження в арматурі другого шару стіни, біля зовнішньої грані, досягають максимальних значень 500 МПа, а біля внутрішньої грані вони менші на 73% та 48% відповідно і дорівнюють: для кута 15° – 195.3 МПа, для кута 45° – 164.2 МПа Рис. 7.

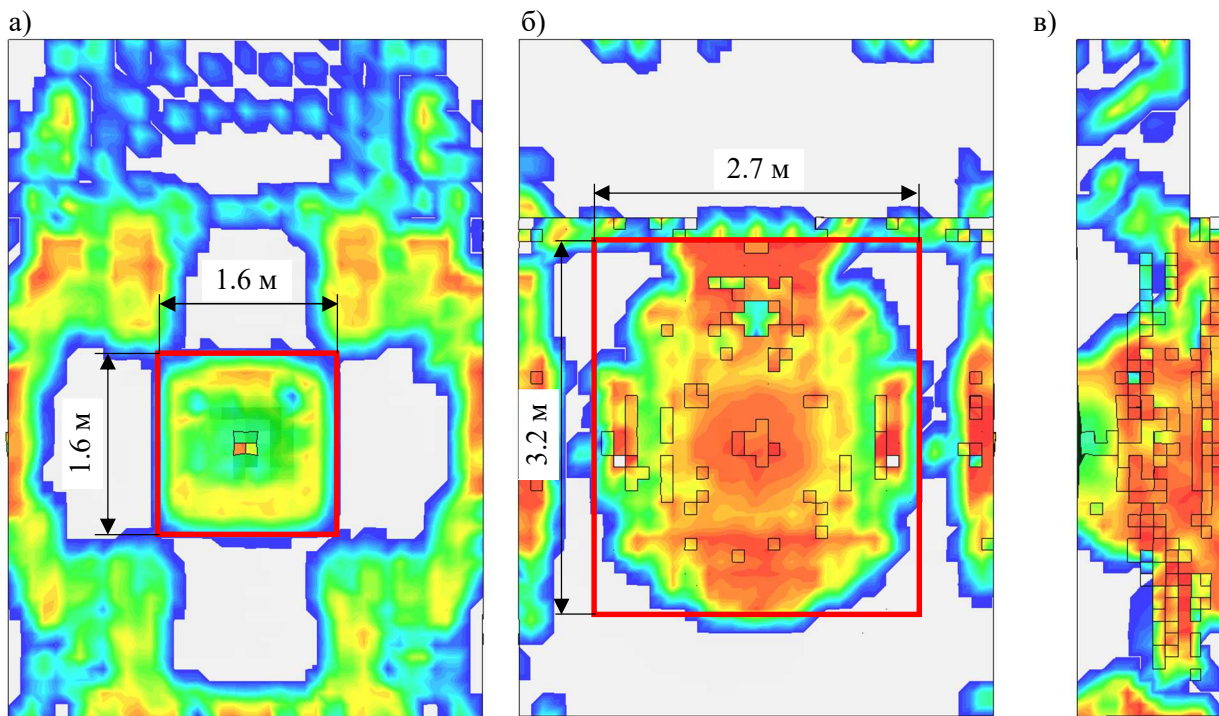


Рис.8. Пластичні деформації стіни в результаті дії вибуху (кут атаки 0°): а) фасад; б) внутрішня сторона; в) розріз.

Fig.8. Plastic deformations of the wall caused by the explosion (attack angle 0°): a) facade; b) inside; c) section.

При впливі вибуху стіна зазнає значних пошкоджень Рис. 8, як на лицьовій так і внутрішній сторонах.

На фасаді пластичні деформації з'являються як посередині стіни, площа зони складає 2.56 м², що на 41% більше за вплив від удару без вибуху, так і на її периферії. Пошкодження на внутрішній стороні

зосереджені в центральній частині і є набагато більшими ніж на фасаді. Площа зони пластичних деформацій складає 8.64 м² (на 18% більша ніж при ударі). На розрізі стіни Рис. 8в можна побачити, що в результаті дії впливу вибуху розрахунком прогнозується повне пробиття, матеріал відшаровується на обох сторонах.

В зовнішньому армуванні стіни відбувається розрив стержнів в першому і другому шарах армування, а напруження біля внутрішньої грані досягають своїх максимальних значень 500 МПа.

Пікові переміщення стіни, що спричинені вибухом, в середньому складають 40 мм, при звичайному ударі під кутом 0° – 6 мм.

Зміна кута нахилу снаряду не має суттєвого значення, дія вибуху спричиняє набагато більший вплив.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі числового моделювання напружено-деформованого стану елементів системи “основа – захисна споруда” при дії на захисну споруду із залізобетону удару снаряду масою 300 кг на швидкість 60 м/с та подальшого вибуху бойової частини вагою вибухової речовини 100 кг у тротиловому еквіваленті, продемонстровано вплив зміни кута атаки снаряду на пошкодження стіни та характер розподілу зон пошкодження. Різниця їх площі для кутів 0° та 60° складає до 70%. Найбільш негативний вплив на стіну має снаряд кут атаки якого дорівнює 0° .

Встановлено, що при влучанні снаряду в стіну під кутом 0° - 15° пошкоджень зазнають зовнішня і внутрішня сторони стіни, а якщо кут 45° - 60° лише зовнішня.

Досліджено зміну напружень в арматурі стіни захисної споруди. При збільшенні кута атаки снаряду, в момент його влучання у стіну, напруження в арматурі зменшуються. Різниця для кутів 0° та 60° складає: біля зовнішньої грані 20% (кут 0° – 500 МПа; кут 60° – 402 МПа), а біля внутрішньої – 73% (кут 0° – 315 МПа; кут 60° – 85 МПа).

Визначено, що вплив вибуху на стіну захисної споруди спричиняє незначні пошкодження на лицьовій стороні, але площа зони пластичних деформацій є більшою на 41%, і дорівнює 2.56 м^2 , в порівнянні із зоною, що утворилась лише в результаті удару під кутом 0° , розміри якої складають 1.5 м^2 . Пошкодження є розподіленими по зовнішній поверхні стіни. На внутрішній стороні пошкодження є значно більшими і зона з ними зосереджена в центральній частині. Вона

дорівнює 8.64 м^2 , що на 18% більша за площу, яку спричинив тільки удар снаряду під кутом 0° розміри якої сягають 7.0 м^2 . Напруження в арматурі стіни досягають своїх граничних значень 500 МПа. Кут атаки снаряду впливає несуттєво, вплив від дії вибуху має набагато більші наслідки.

Отримано максимальні переміщення стіни в результаті дії вибуху та удару під кутом 0° . Їх значення не перевищують 6 мм для удару та 40 мм для вибуху.

Запропонований тип конструкцій захисної споруди в цілому є надійним та виконує свою захисну функцію.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. 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.
2. Ghaemmaghami, A., Liu, Y., Abrishami, H., & Han, X. M. NUMERICAL MISSILE SIMULATION OF PUNCHING TEST SPECIMENS CONTAINING LONGITUDINAL REINFORCING AND T-HEADED BARS.
3. Schmied, C., & Erhart, T. (2018). Updated review of solid element formulations in LS-DYNA. 15th German LS-DYNA Forum Bamberg.
4. LS-DYNA, Livermore software technology cooperation, LS-DYNA keyword user's manual, 2025. URL: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Vol_I.pdf
5. LS-DYNA, Livermore software technology cooperation, LS-DYNA material models manual, 2025. URL: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Theory.pdf
6. Murray, Y. D. (2007). *Users manual for LS-DYNA concrete material model 159* (No. FHWA-HRT-05-062). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology.
7. Schwer, L., Teng, H., & Souli, M. (2015, June). LS-DYNA air blast techniques: Comparisons with experiments for close-in charges. In 10th European LS-DYNA Conference (pp. 15-17).
8. Huang, Y., Willford, M. R., & Schwer, L. E. (2012, June). Validation of LS-DYNA® MMAL with blast experiments. In 12th International LS-DYNA Users Conference (pp. 1-12).

Numerical simulation of impact and explosion effects on elements of the “foundation–protective structure” system.

*Viktor NOSENKO,
Dmytro NECHYPORENKO*

Summary Designing reliable protective structures or individual structural elements requires a comprehensive analysis of the stress–strain behavior of their components within the “foundation–protective structure” system under various types of loading. It is essential to consider multiple input parameters that directly influence the calculation results.

This study presents the results of numerical simulations assessing the effect of a projectile with a mass of 300 kg and a velocity of 60 m/s striking a fragment of a protective wall. The projectile’s attack angle relative to the horizontal varied and took the following values: 0°, 15°, 45°, and 60°. Additionally, the effect of detonation of a warhead containing approximately 100 kg of explosive (TNT equivalent) was analyzed. The calculations were performed using the ANSYS/LS-DYNA software package.

The wall fragment has a thickness of 1200 mm and is supported by shallow foundations. The wall is reinforced with four layers of steel bars of varying diameters and variable spacing. The roof of the protective structure is a multilayer reinforced concrete slab resting on steel beams.

In developing the numerical model of the “foundation–protective structure” system, the Lagrangian method was used. The geometry of the wall, roof, foundation, and soil was modeled with solid elements, while the discrete reinforcement of the reinforced concrete components was modeled using beam elements. To simulate the explosion, a Lagrangian–Eulerian approach was applied. The explosive material was defined physically, and its behavior was described by an equation of state.

The analysis of projectile impact on the wall fragment of the protective structure revealed that changes in the projectile’s attack angle have a significant effect on the extent and pattern of structural damage. The difference between the damaged areas for attack angles of 0° and 60° reaches up to 70%, while the variation in reinforcement stress values is 20% and 73% for the outer and inside faces of the wall, respectively.

The study also demonstrates the nature of wall damage caused by the explosion. On the outer face, the damage is distributed, whereas on the inside face, it is concentrated in the central region. The

area of plastic deformation zones is 41% larger for the outer and 18% larger for the inside face compared to those caused by projectile impact at an attack angle of 0°. The reinforcement stresses reach ultimate values of up to 500 MPa. Under combined effects, the explosion has a significantly greater impact on the protective structure wall, while the attack angle has a negligible influence.

Key words. Protective structure, numerical simulation, impact, explosion, Ansys/LS-Dyna.