

## Числове моделювання дії удару та вибуху на стіну захисної споруди

Віктор Носенко, доц., канд. техн.наук., зав. кафедри геотехніки<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-8261-1846), Дмитро Нечипоренко, асистент<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0006-6697-2381)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### АНОТАЦІЯ

За допомогою числового моделювання напружено-деформованого стану елементів системи "основа - захисна споруда" було досліджено вплив удару снаряду та подальшої детонації його бойової частини на несучу здатність споруди та її надійність.

*Ключові слова:* захисна споруда, числове моделювання, удар, вибух, Ansys

### 1. ВСТУП

Сьогодні в Україні проектування та будівництво захисних споруд для елементів об'єктів критичної інфраструктури є надзвичайною задачею. Для прийняття надійного та економічно ефективного проектного рішення конструкцій захисних споруд необхідно розрахунком обґрунтувати їх параметри. Розрахунок має враховувати багато факторів, серед яких основними є: інтенсивність дії ударного та вибухового навантажень, які по своєму характеру є високоенергетичними імпульсами з коротким часом дії, реальні параметри матеріалів захисних конструкцій та оточуючого середовища. Для оцінки впливу удару необхідно враховувати вагу снаряду, кут його атаки і швидкість руху, а для оцінки впливу вибухової ударної хвилі - масу вибухової речовини, а також відстань від епіцентру вибуху до споруди і середовище в якому розповсюджується вибухова ударна хвиля. Комплексно оцінити дію таких факторів сьогодні можна або натурними експериментами, які є достатньо дорогими та унікальними, або з використанням числового моделювання напружено-деформованого стану елементів системи "основа - захисна споруда" із застосуванням програмних комплексів спроможних виконувати розрахунки динамічних впливів із прямим інтегруванням рівнянь руху в часі та у бібліотеці яких є необхідний набір моделей поведінки матеріалів. Сьогодні одним із світових лідерів для таких розрахунків є ПК Ansys [1,2] який і було використано в даному дослідженні.

### 2. ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження впливу кута атаки снаряду на захисну споруду був обраний фрагмент стіни захисної споруди товщиною 1200 мм. Бетон стіни класу С32/40, армування виконане в чотири шари сітками із арматури класу А500С різного діаметру встановленою із перемінним кроком. Основою для стіни слугують фундаменти неглибокого закладання. Конструкція покриття захисної споруди складається із багатошарової залізобетонної плити з бетону класу С32/40 виконаної по сталевих балках.

Снаряд, що використаний при моделюванні ударного впливу на стіну має вагу близько 300 кг, діаметром до 250 мм та в момент зіткнення рухається зі швидкістю близько 60 м/с. Було розглянуто декілька варіантів кута атаки снаряду під якими він влучав у стіну: 0°, 15°, 45°, 60°.

Окремо зроблена оцінка впливу вибуху на поверхні стіни з одночасним влучанням снаряду, що імітує детонацію бойової частини при влучанні. Снаряд моделювався як жорстке тіло. Дія вибухової речовини вагою близько 100 кг моделювалася фізично та вибух був описаний за допомогою рівнянь стану.

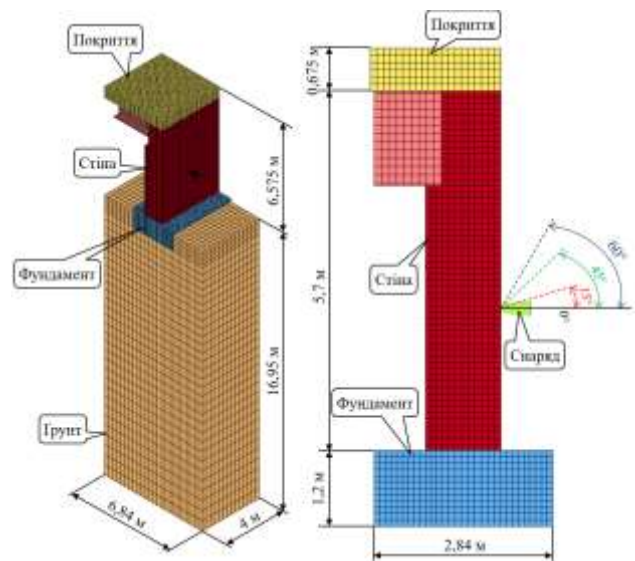


Рисунок 1. Скінчено-елементна модель фрагменту системи: "основа-захисна споруда"

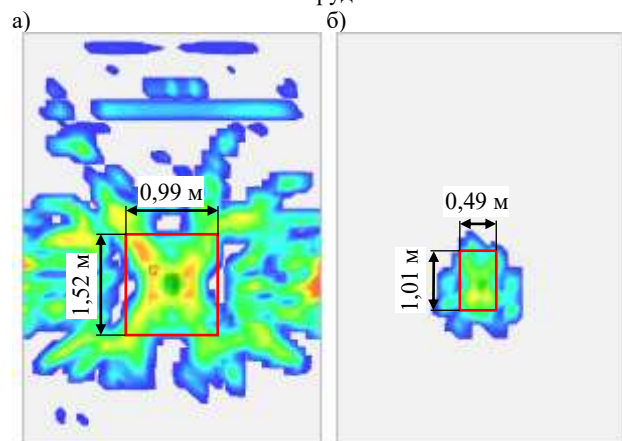


Рисунок 2. Пластичні деформації на зовнішній частині стіни в результаті удару: а) кут атаки 0°; б) кут атаки 60°

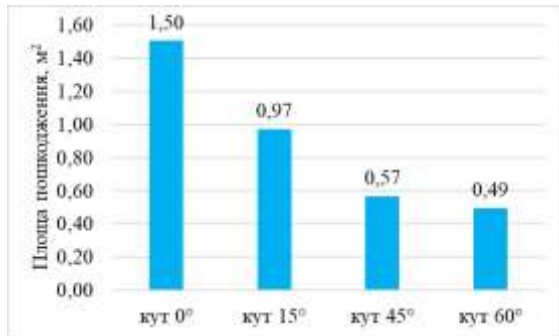


Рисунок 3. Залежності розмірів площі пошкодження стіни від зміни кута атаки снаряду

Згідно розрахунку встановлено, що при влучанні в стіну снаряду під кутами 0° та 15° виникає розтріскування із середини, тобто пошкоджень зазнає лицьова сторона стіни, а також виникає відшарування матеріалу на внутрішній стороні. Влучання снаряду в стіну під кутами 45° та 60° спричиняє вищерблення на лицьовій стороні.

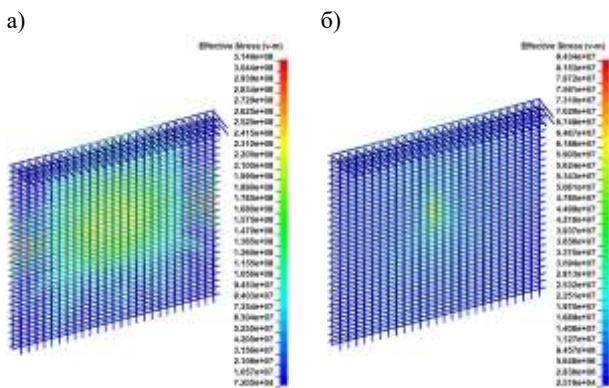


Рисунок 4. Ізополя напружень арматури біля внутрішньої грані стіни в результаті удару: а) кут 0°; б) кут 60°



Рисунок 5. Графік залежності напружень в арматурі біля внутрішньої грані стіни від зміни кута атаки снаряду

В результаті влучання снаряду у стіну, під кутом 0°, в арматурі, що розташована біля зовнішньої грані стіни яка приймає удар, відбувається локальний розрив стержнів у першому, найближчому до зони удару, шарі армування, а в другому шарі – напруження досягають своїх граничних значень і складають до 500 МПа. При збільшенні кута атаки до 60° також можливий локальний розрив стержнів у першому шарі армування, а в другому – напруження

складають 252 МПа, що на 50% менше за напруження, що виникають при куті атаки 0°.

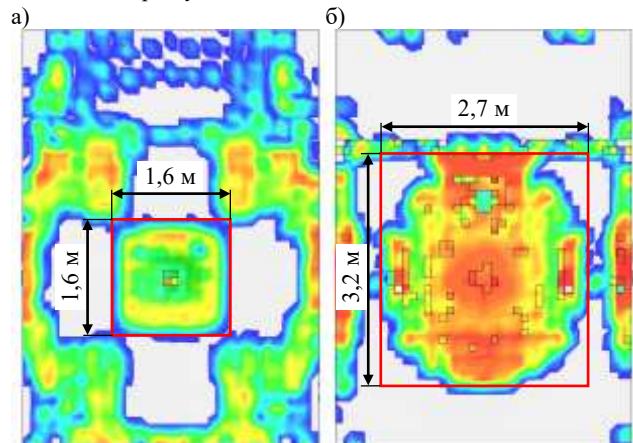


Рисунок 6. Пластичні деформації на зовнішній та внутрішній частинах стіни в результаті вибуху

При впливі вибуху стіна зазнає пошкоджень, як на лицьовій так і внутрішній сторонах. На лицьовій зоні пластичних деформацій з'являються як в центральній частині так і по краях стіни, але пошкодження є незначними. На внутрішній стороні зони пластичних деформацій зосереджені в центральній частині стіни і рівень пошкоджень є значно більшим.

В результаті дії вибуху на стіну її пікові переміщення в середньому складають 40 мм.

### 3. ВИСНОВКИ

Продемонстровано, що зміна кута атаки снаряду, може значно вплинути на її пошкодження та характер розподілу зон пластичних деформацій. Різниця площі пошкодження стіни для кутів 0° та 60° складає до 70%.

Досліджено, що при збільшенні кута атаки снаряду при його влучанні у стіну захисної споруди напруження в арматурі біля зовнішньої грані стіни зменшуються на 50%, а біля внутрішньої – зменшуються на 73%.

Встановлено, що вплив вибуху на стіну захисної споруди спричиняє незначні пошкодження на лицьовій стороні стіни і вони є розподіленими по її поверхні. На внутрішній стороні пошкодження є значно більшими і зони з пластичними деформаціями зосереджені в центральній частині стіни. Зміна кута нахилу снаряду не має суттєвого значення, дія вибуху спричиняє набагато більший вплив.

Отримано максимальні переміщення стіни в результаті дії вибуху складають близько 40 мм.

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

### Список літератури

[1] 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\\_1.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Vol_1.pdf)

[2] 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](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/DRAFT/DRAFT_Theory.pdf)