



С. В. Поздєєв¹, А. П. Гаврись², Н. Ю. Тур², Р. С. Яковчук², О. В. Любовецький²

¹ Національний університет цивільного захисту, м. Черкаси, Україна

² Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9085-0513> – С. В. Поздєєв

<https://orcid.org/0000-0003-2527-7906> – А. П. Гаврись

<https://orcid.org/0000-0002-0557-5351> – Н. Ю. Тур

<https://orcid.org/0000-0001-5523-5569> – Р. С. Яковчук

<https://orcid.org/0009-0007-7904-9091> – О. В. Любовецький

✉ svp_chipbbk@ukr.net

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ПРИДАТНОСТІ ЗАХИСНИХ СПОРУД (УКРИТТІВ) МОДУЛЬНОГО ТИПУ ПІД ЧАС ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОГО НАПАДУ ПРОТИВНИКА

Вступ. Важливим фактором, що визначає ефективність захисних споруд у будівельних об'єктах міської забудови, є здатність їхніх огорожувальних конструкцій зберігати свої огорожувальні функції в умовах бойових дій, блокувати вплив уражаючих факторів з причини авіаційних, ракетних та артилерійських обстрілів, а також захищати людей від ураження уламками та осколками будівельних конструкцій. Актуальною проблемою сьогодні в умовах повномасштабного вторгнення країни-агресорки є захист критичної інфраструктури, зокрема, енергооб'єктів, енергокомунікацій тощо. Для здійснення цього захисту застосовуються спеціально облаштовані захисні споруди, переважно зведені із залізобетонних монолітних огорожувальних конструкцій.

Мета дослідження. Обґрунтування загального розрахунково-теоретичного підходу до методів розрахункового оцінювання захисної здатності укриттів модульного типу, узгодженого із нормами, чинними в Україні, зокрема ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту. Будинки і споруди» під час впливу ударної хвилі вибуху.

Методи дослідження. Аналіз руйнування тіл з врахуванням відповідних теорій пластичності та міцності. Для здійснення розрахунку використані сучасні обчислювальні технології, засновані на використанні сучасного програмного забезпечення та числових алгоритмах. Використані обчислювальні алгоритми на базі явного методу інтегрування рівнянь динаміки за часом, методу скінченних елементів, опис контактної взаємодії на основі методу штрафних функцій, а також математичних моделей матеріалів в умовах швидкісного деформування з врахуванням їхніх нелінійних властивостей та критеріїв їхнього руйнування, базованих на відповідних теоріях міцності.

Результати дослідження. Встановлено закономірності взаємозв'язку між параметрами вибуху та стійкістю конструктивних елементів споруд (зокрема стін з бетонних лего-блоків), що має важливе значення для оцінки їх залишкової захисної здатності.

Використання сучасних методів числового моделювання (метод скінченних елементів, явний метод інтегрування рівнянь динаміки, моделі контактної взаємодії та нелінійні моделі матеріалів) дало змогу отримати уявлення щодо механізмів руйнування та показників втрати цілісності захисних конструкцій внаслідок впливу вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротиловим еквівалентом заряду m (TNT) = 718,2 кг.

Досліджено механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановлено взаємозв'язок цих аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротиловим еквівалентом заряду m (TNT) = 30 кг, та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні огороження укриття $L = 0,5$ м. Отримано розподіли пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкції укриття з бічної сторони, з торцевої сторони (ближче до дверей) та над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині.

Ключові слова: захисна споруда, засоби повітряного нападу, руйнування елементів конструкцій захисних споруд, методи розрахункової оцінки, моделювання руйнувань, LS-DYNA.

CALCULATED ASSESSMENT OF THE FUNCTIONAL SUITABILITY OF MODULAR-TYPE PROTECTIVE STRUCTURES (SHELTERS) DURING THE USE OF ENEMY AIR ATTACK WEAPONS

Introduction. An important factor determining the effectiveness of protective structures in urban construction projects is the ability of their enclosing elements to maintain their protective functions under combat conditions, block the impact of damaging factors caused by air, missile, and artillery strikes, and protect people from debris and fragments of building structures. A pressing issue today, in the context of a full-scale invasion by an aggressor country, is the protection of critical infrastructure, particularly energy facilities and energy communications. To provide such protection, specially equipped protective structures are used, primarily constructed from reinforced concrete monolithic enclosing elements.

Research Objective. To justify a general computational and theoretical approach to methods for calculating the protective capacity of modular shelters in accordance with the standards in force in Ukraine, specifically DBN V.2.2-5:2023 “Civil Defence Structures. Buildings and Structures,” under the impact of an explosive shock wave.

Research Methods. The analysis of structural destruction was performed with consideration of relevant plasticity and strength theories. Modern computational technologies, utilizing advanced software and numerical algorithms, were employed for the calculations. Computational procedures were based on the explicit integration method for dynamic equations over time, the finite element method, and the description of contact interactions using the penalty function method. Mathematical models of materials under high-speed deformation were applied, accounting for their nonlinear properties and failure criteria in accordance with the relevant strength theories.

Research Results. Patterns of correlation between explosion parameters and the stability of structural elements, in particular walls made of concrete lightweight blocks, have been established, which is important for assessing their residual protective capacity.

The use of modern numerical modeling methods—including the finite element method, explicit integration of dynamic equations, contact interaction models, and nonlinear material models—enabled insight into the mechanisms of destruction and indicators of loss of integrity of protective structures as a result of explosions. This analysis included the most critical combination of explosion parameters, with a TNT equivalent charge of $m(\text{TNT}) = 718.2$ kg.

The mechanisms of destruction or integrity loss in shelter structures were investigated, and their relationship to the performance of protective functions under an explosion with a TNT equivalent charge of $m(\text{TNT}) = 30$ kg and a minimum distance from the epicenter to the shelter surface of $L = 0.5$ m. Distributions of plate deformations were obtained for blast wave pressure applied to the shelter structure from the side, the end (closer to the door), and above the upper horizontal surface in the middle.

Keywords: protective structure, air attack protection, destruction of structural elements, computational assessment methods, damage modeling, LS-DYNA.

Вступ. Важливим фактором, що визначає ефективність захисних споруд у будівельних об'єктах міської забудови, є здатність їхніх огорожувальних конструкцій зберігати свої огорожувальні функції в умовах бойових дій, блокувати вплив уражаючих факторів з причини авіаційних, ракетних та артилерійських обстрілів, а також захищати людей від ураження уламками та осколками будівельних конструкцій. Також важливим аспектом, що визначає ефективність захисних споруд, є можливість безпечної евакуації після руйнування будівельних конструкцій внаслідок влучання в них засобів повітряного нападу. Для захисту населення за таких умов можливе використання захисних укриттів модульної конструкції (типу) [1-6].

Ці укриття мають складну структуру, що складається із залізобетонної капсули, частини якої з'єднані між собою. Ці блоки встановлюються на ґрунт без фундаментних та

підкріплюючих конструкцій [1-6]. Також актуальною проблемою в наш час в умовах повномасштабного вторгнення країни-агресорки є захист критичної інфраструктури, зокрема, енергооб'єктів, енергокомунікацій тощо. Для здійснення цього захисту застосовуються спеціально облаштовані захисні споруди, переважно зведені із залізобетонних монолітних огорожувальних конструкцій [1-7].

При обґрунтуванні захисної здатності укриттів тієї чи іншої конструкції можуть бути застосовані декілька підходів. В Україні на поточний час введено в дію оновлений державний будівельний стандарт ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільної захисту. Будинки і споруди», що встановлює основні принципи та визначає методологічні підходи до розрахункового оцінювання захисної здатності конструкцій захисних укриттів та споруд проти повітряних обстрілів. Цей стандарт встановлює підхід до

розрахункової оцінки захисної здатності конструкцій, який ґрунтується на застосуванні традиційних методів розрахунку за умови впливу ударної хвилі вибуху за допомогою статичного тиску. Величина цього тиску ранжована за класами захисних споруд та допустимим тиском ударної хвилі, згідно із встановленою класифікацією, наданою у цьому ж стандарті. Цей підхід не має суворого теоретичного обґрунтування, проте він може бути застосований оскільки дає великі запаси міцності конструкцій і це сприймається радше як суттєва перевага. Проте такий підхід не може вважатися універсальним, бо якщо розглядати захисну здатність споруд подвійного призначення, що розташовані всередині конструкцій, то навантаження від вибуху, суттєво знижуються від подолання ними зовнішніх огорожувальних конструкцій. Але при цьому на конструкції укриттів можливий додатковий вплив з боку уламків та зруйнованих частин цих зовнішніх конструкцій. Застосовуючи підхід на основі прикладання квазістатичних навантажень при відтворенні впливу ударної хвилі вибуху часто важко обґрунтувати, що внутрішні огорожувальні конструкції, де має бути улаштоване укриття, мають достатню захисну здатність, що в багатьох випадках не відповідає дійсності.

Враховуючи вищезазначене, актуальною задачею є обґрунтування методів, що дозволяють розглядати вплив вибухового навантаження на елементи конструкцій захисних укриттів для визначення їхньої ефективності.

Мета дослідження. Обґрунтування загального розрахунково-теоретичного підходу

до методів розрахункового оцінювання захисної здатності укриттів модульного типу узгодженого із нормами, чинними в Україні, зокрема ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту. Будинки і споруди» під час впливу ударної хвилі вибуху.

Методи дослідження. Розрахунково-теоретичний підхід, що заснований на використанні диференціальних рівнянь динаміки механічних систем у поєднанні із диференціальними рівняннями для описання напружено-деформованого стану (НДС) тіл при їхній контактній взаємодії і впливі вибуху. Аналіз руйнування тіл з врахуванням відповідних теорій пластичності та міцності. Для здійснення розрахунку використані сучасні обчислювальні технології, засновані на використанні сучасного програмного забезпечення та числових алгоритмах. Використані обчислювальні алгоритми на базі явного методу інтегрування рівнянь динаміки за часом, методу скінченних елементів, опис контактної взаємодії на основі методу штрафних функцій, а також математичних моделей матеріалів в умовах швидкісного деформування з врахуванням їхніх нелінійних властивостей та критеріїв їхнього руйнування, базованих на відповідних теоріях міцності.

Результати дослідження. У якості прикладу була розглянута захисна стіна, конструктивна система якої включає стіну з бетонних лего-блоків, на яку впливає ударна хвиля від вибуху при підриві снаряду з еквівалентною масою TNT 718.2 кг. На рис. 1 наведена конструктивна система захисної стіни і вибуху, впливу якого вона піддається.

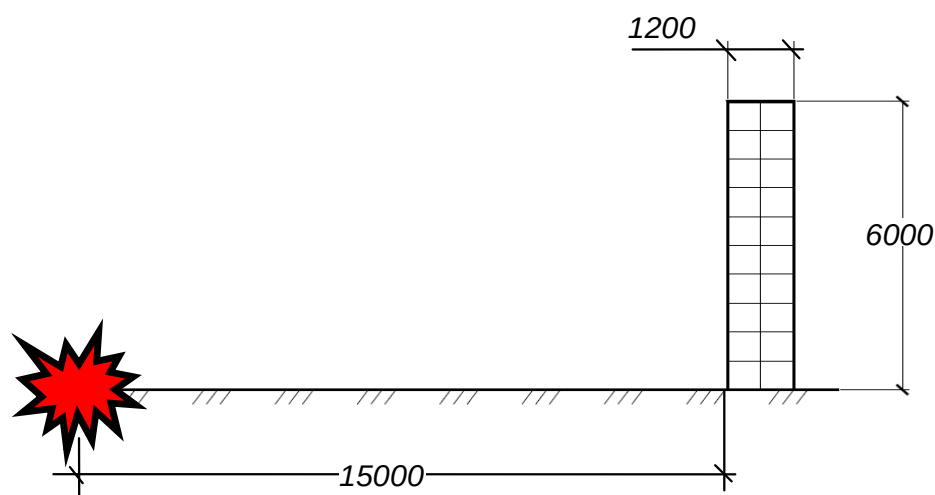


Рисунок 1 – Конструктивна схема елемента залізобетонної конструкції захисної стіни

На рис. 2 наведена розрахункова схема для обчислення навантаження впливу вибуху.

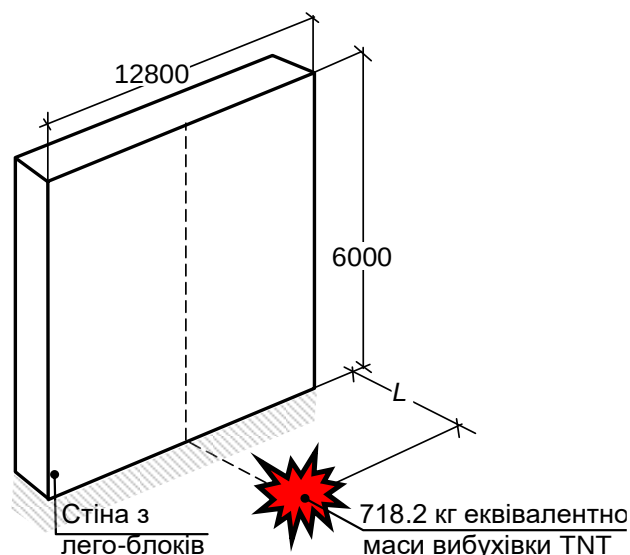


Рисунок 2 – Розрахункова схема для обчислення навантаження впливу вибуху

При визначенні квазістатичного навантаження на стіну з лего-блоків визначена дистанція від епіцентру вибуху до поверхні стіни, включаючи величини $L = 15$ м, яка вимірюється по нормалі до поверхні.

Скінченно-елементна схема захисної стіни наведена на рис. 3. На цій схемі відображена скінченно-елементна дискретизація всіх компонентів-частин математичної моделі захисної стіни.

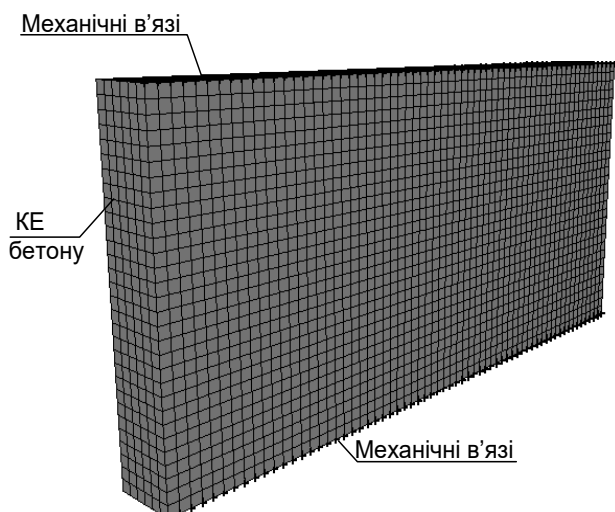
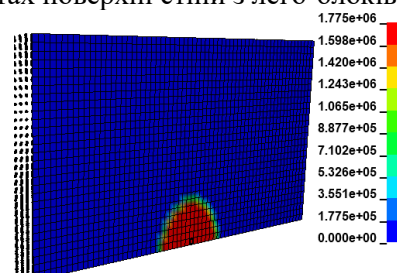


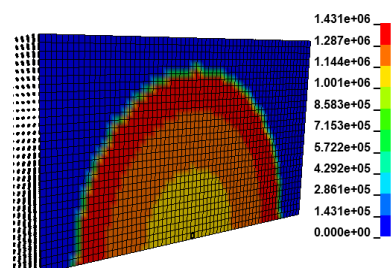
Рисунок 3 – Скінченно-елементна схема захисної стіни для визначення навантаження

Після проведення розрахунків було отримано результати, які дозволяють дослідити динамічні навантаження впливу вибуху. Було досліджено вплив вибуху за сценарієм із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротильовим еквівалентом заряду m (TNT) = 718,2 кг, та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні захисної стіни $L = 15$ м.

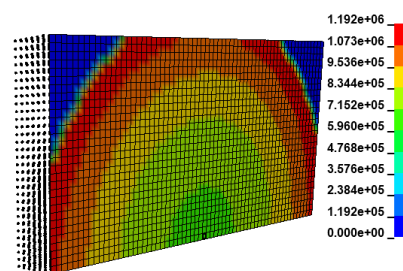
За умов даної розрахункової схеми було отримано розподіл надлишкового тиску по сегментах поверхні стіни з лего-блоків (рис. 4).



1 мс



2 мс



3 мс

Рисунок 4 – Розподіли надлишкового тиску по сегментах поверхні захисної стіни у різні моменти впливу вибуху

Надлишковий тиск вибуху є максимальним у сегменті поверхні стіни, розташованому навпроти епіцентру вибуху. На рис. 5 наведений графік зміни тиску вибуху для відстані 15 м від поверхні стіни до епіцентру вибуху.

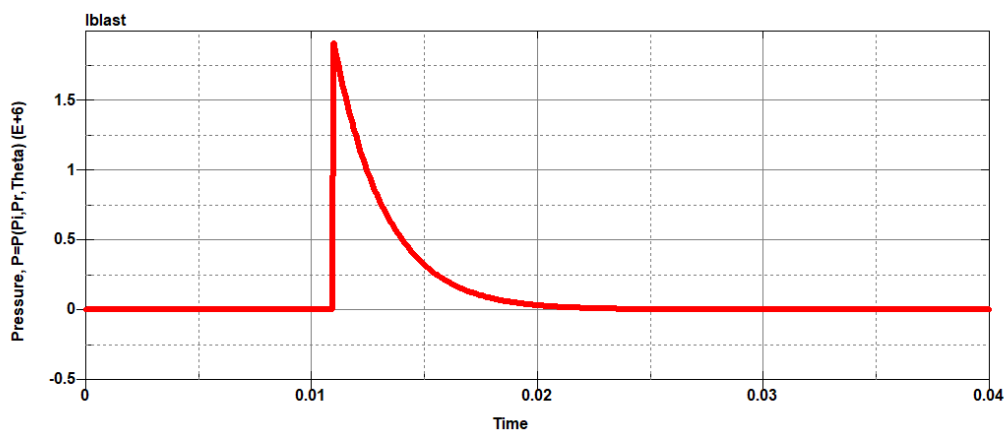


Рисунок 5 – Максимальний надлишковий тиск для відстані 15 м від поверхні стіни до епіцентру вибуху

Аналізуючи дані на рис. 5, було визначено надлишковий тиск, що може бути прийнято в якості навантаження. У табл. 1 наведено відповідні значення надлишкового тиску вибуху.

Таблиця 1

Значення максимального тиску вибуху на сегменти поверхні стіни

Відстань до епіцентру вибуху, L, м	15
Максимальний надлишковий тиск, ΔP_{exp} , кПа	1924

На рис. 6 показані конструктивні схеми елементів конструкцій захисних споруд в умовах вибуху та впливу вибухової хвилі.

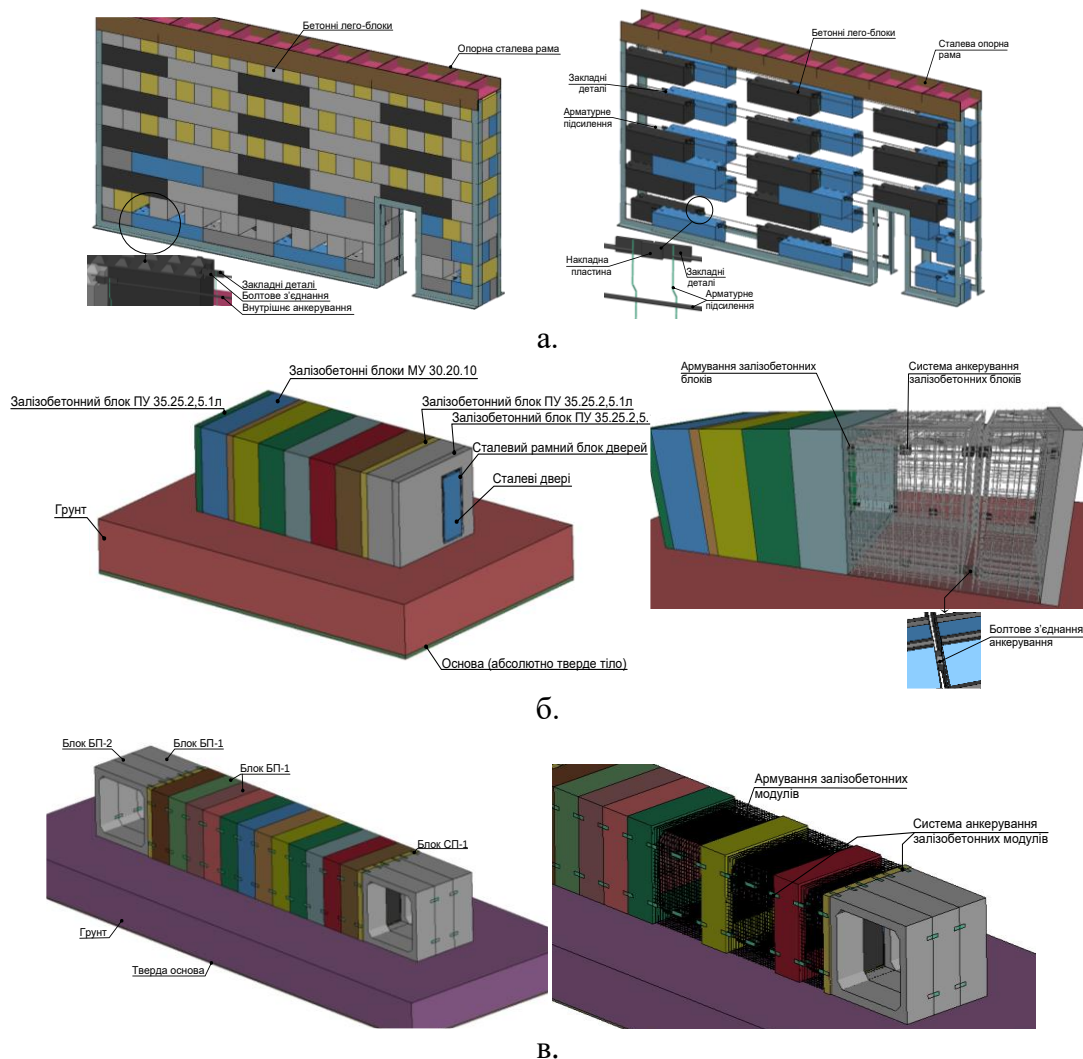


Рисунок 6 – Конструктивні схеми різних елементів захисних споруд: а – захисна стіна з леґо-блоків; б – елементи конструкцій модульного укриття 1 типу; в – елементи конструкцій модульного укриття 2 типу

Технічні дані, які необхідні для створення комплексу початкових параметрів моделі матеріалу бетону, наведені в табл. 2. У цій таблиці

зазначені основні характеристики для моделі матеріалу бетону [1 - 7].

Таблиця 2

Параметри математичної моделі бетону

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Густина	кг/м ³	2500
Границя міцності	МПа	32
Врахування швидкості деформації		Враховується
Розмір крупного заповнювача	м	0,02

Технічні дані, які необхідні для моделі матеріалу сталі опорної рами, закладних деталей та арматурних стрижнів, наведені в

табл. 3. У цій таблиці зазначені основні характеристики для моделі матеріалу арматурної сталі та анкерування.

Таблиця 3

Параметри математичної моделі сталі

Арматурн. елемент	Коеф. Пуасона	Модуль пруж., ГПа	Межа текуч., МПа	Густина, кг/м ³	Гранична деформація	Швидкість деф.
Закладні деталі	0,3	210	345	7850	0,15	Враховується
Стрижні			500			

На рис. 7 показана схема конструктивних елементів захисної стіни й відповідних їм моделей матеріалів, згідно із номенклатурою

комп'ютерної системи LS-DYNA, а також схема прикладання граничних умов.

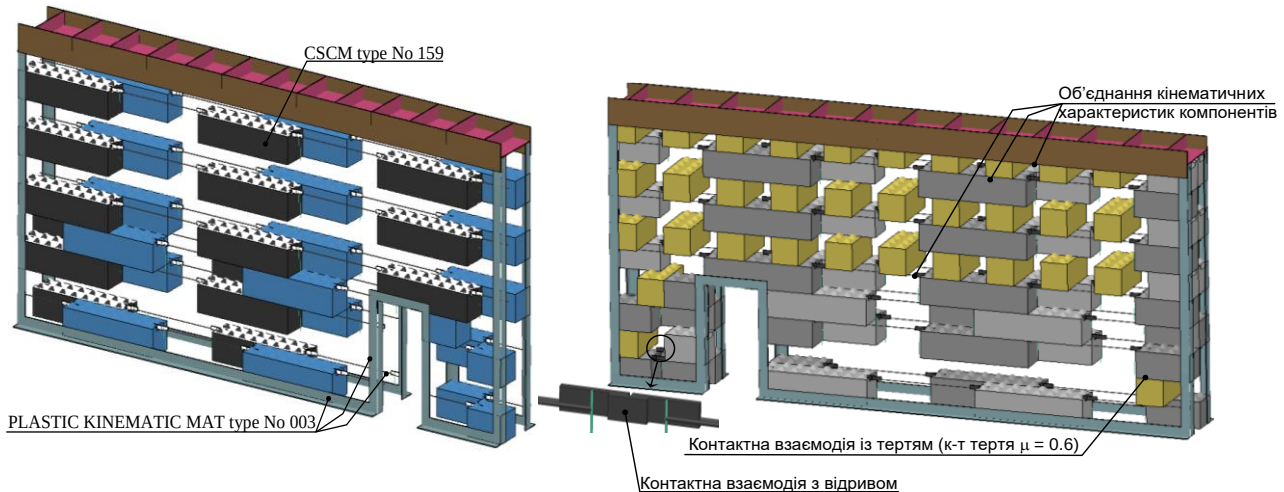


Рисунок 7 – Схема конструктивних елементів захисної стіни й відповідних їм моделей матеріалів (а) та схема прикладання граничних умов (б)

На рис. 7 у наведеній схемі показаний приклад розбиття моделі на окремі частини захисної стіни з бетонних лего-блоків. Частини моделі є твердими тілами, поведінка яких має відповідати прийнятим моделям матеріалів. Спирання поверхонь частин моделі захисної стіни та між собою, здійснюється шляхом моделювання контактної взаємодії між даними окремими частинами моделі, автоматично створеними в системі як частини з різного матеріалу. Контактна

взаємодія враховує тертя між частинами за узагальненим законом Кулона з коефіцієнтом тертя $\mu = 0,6$ (тертя між бетонними поверхнями).

При об'єднанні переміщень частин моделі, відповідних до бетону, опорної рами, закладних деталей анкерування та арматури використовується алгоритм системи пошуку спільних точок перетинання лінійних або плоских СЕ з об'ємними СЕ за допомогою лінійної інтерполяції та поєднання

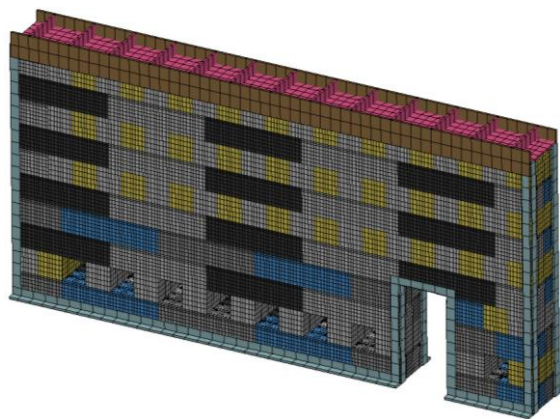
їхніх переміщень. Цей алгоритм заснований на способі множників Лагранжа.

Для вивчення впливу вибуху на конструкції захисної стіни з бетонних лего-блоків використовується два типи навантаження: навантаження від власної ваги конструкцій та навантаження від вибуху. Навантаження від власної ваги прикладається до всіх компонентів моделі і має постійну дію, проте в момент його прикладення при застосуванні явного методу інтегрування рівнянь динаміки за часом з'являється небажана кінетична енергія, що проявляється, як правило у коливальному процесі певної тривалості його затухання.

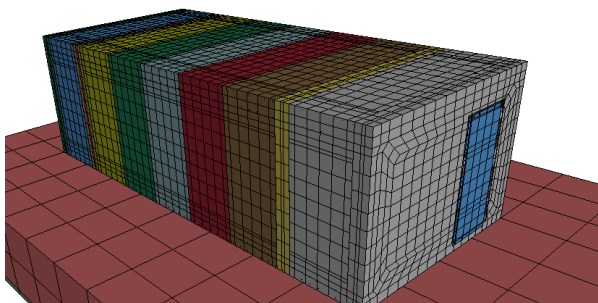
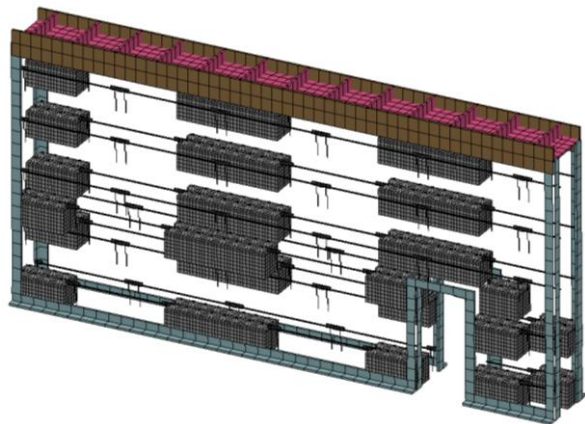
Для визначення надлишкового тиску ударної хвилі з врахуванням рекомендацій UFC 3-340-02 [7] використовується модель Kingery-Bulmash [1 – 7, 8 – 20], на основі обчислювального алгоритму CONWEP, який включає використання емпіричних залежностей моделі Kingery-Bulmash з врахуванням послаблення ударної хвилі при її непрямому падінні, а також врахуванням посилення тиску ударної хвилі через відбиття від поверхні ґрунту і відбиваючої поверхні конструктивної системи. При цьому всі ці припущення та явний алгоритм інтегрування рівнянь динаміки конструктивної системи дозволяють враховувати поширення

фронту ударної хвилі по всіх поверхнях цієї конструктивної системи з врахуванням зростання тиску у фронті, його послаблення і набування від'ємних величин, згідно з рис. 7. При цьому можуть бути використані два типи вибуху – вибух на великій дистанції від поверхні та вибух поблизу поверхні із підсиленням тиском ударної хвилі через відбиття від неї. У даному випадку вибирається другий варіант як розумне збільшення жорсткості вимог до проектних даних конструктивної системи, а також можливість верифікувати прикладені навантаження, оскільки вони відповідають результатам, отриманим при використанні емпіричних залежностей моделі Kingery-Bulmash.

Для проведення обчислень було побудовано скінченно-елементні схеми захисних споруд, що наведені на рис. 8. На цих схемах відображена скінченно-елементна дискретизація всіх компонентів-частин математичних моделей захисної стіни та модульних захисних залізобетонних укриттів. На схемах показаний принцип розділення компонентів моделі на частини з врахуванням їхньої контактної взаємодії. При побудові скінченно-елементних схем всіх захисних споруд використані три типи елементів: об'ємні, планарні (плоскі) та стержневі.



а.



б.

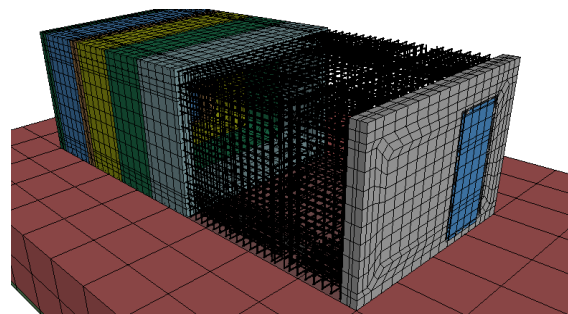
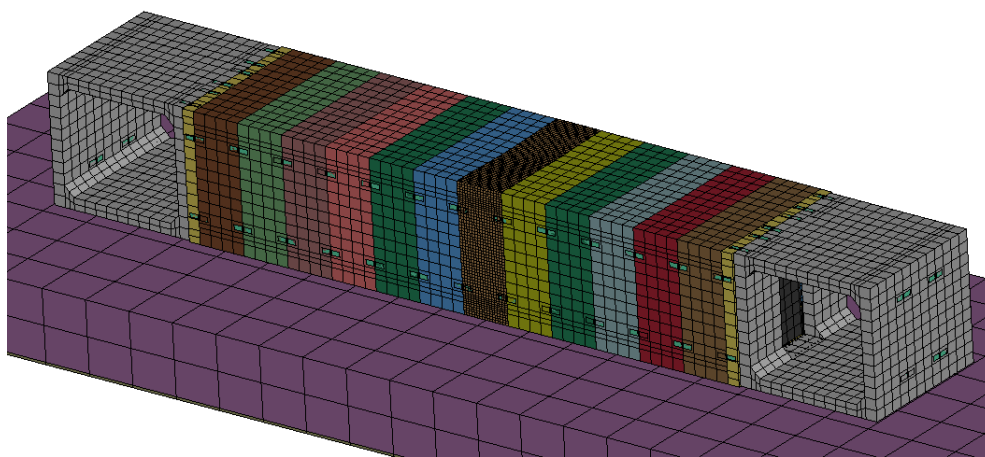


Рисунок 8 – Скінченно-елементні схеми різних захисних споруд: а – захисна стіна з лего-блоків; б – модульне укриття 1 типу;



В.

Продовження рисунку 8 – Скінченно-елементні схеми різних захисних споруд: в – модульне укриття 2 типу

Після проведення розрахунків було отримано результати, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій захисної стіни з бетонних лего-блоків і встановити взаємозв'язок цих аспектів із забезпеченням виконання її захисних функцій в умовах впливу вибуху. Для вивчення механізмів руйнування або втрати цілісності було досліджено вплив вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів

вибуху із тротилівим еквівалентом заряду m (TNT) = 718,2 кг.

Як описано вище, навантаження системи відбувалося в два етапи. На першому етапі прикладалося гравітаційне навантаження власної ваги елементів системи. На рис. 9 показано розподіл вертикальних переміщень у бетонних елементах системи після прикладення гравітаційного навантаження.

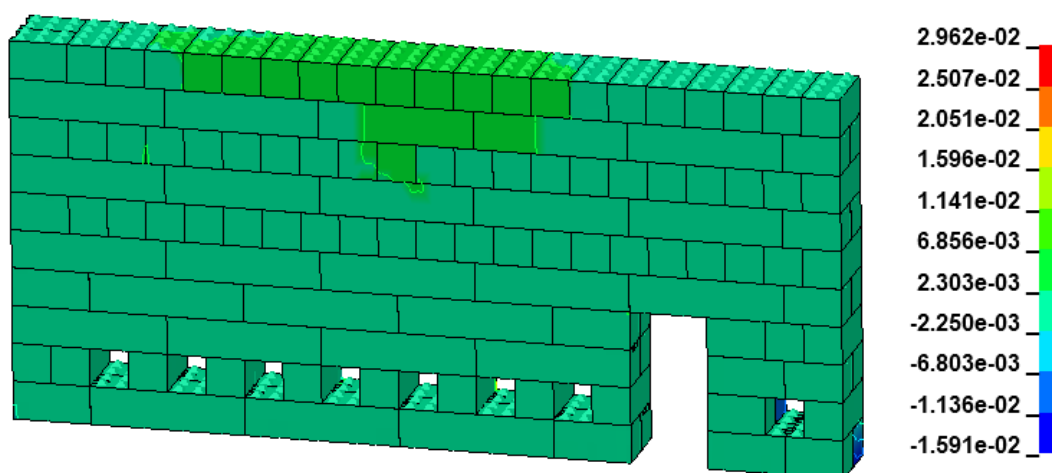


Рисунок 9 – Розподіл вертикальних переміщень бетонних елементів конструкційної системи захисної стіни з бетонних лего-блоків (м) після прикладення гравітаційного навантаження

На рис. 9 можна побачити, що найбільшого переміщення зазнають верхні шари захисної стіни.

Для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано розподіл пластичних деформацій

після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій захисної стіни. Побудований розподіл представлений на рис. 10.

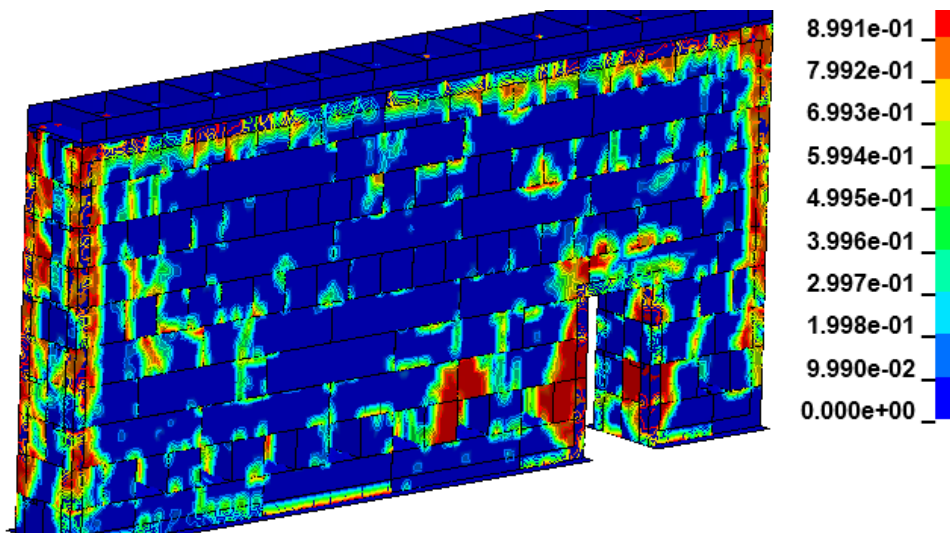


Рисунок 10 – Розподіл пластичних деформацій у бетонних блоках конструкційної системи захисної стіни з бетонних лего-блоків після прикладення тиску від вибухової хвилі

Також для дослідження поведінки стіни було побудований розподіл переміщень після прикладення тиску від вибухової хвилі до

поверхні конструкцій захисної стіни. Побудований розподіл представлений на рис. 11.

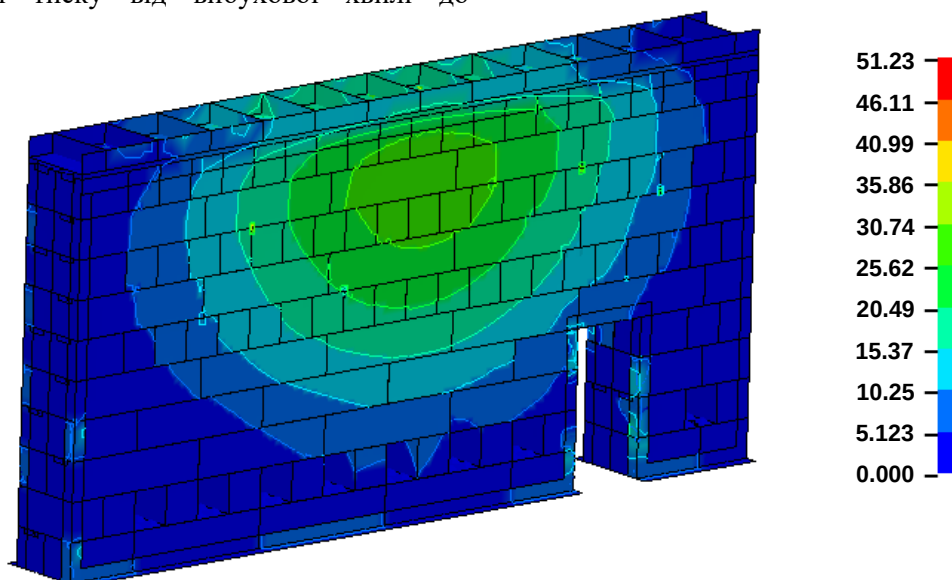


Рисунок 11 – Розподіл повних переміщень (мм) у бетонних блоках конструкційної системи захисної стіни з бетонних лего-блоків після прикладення тиску від вибухової хвилі

Зображення на рис. 9 – 11 показує, що під впливом вибуху найбільших деформацій зазнають верхні поперечні лего-блоки, проте руйнування не відбувається.

Після проведення розрахунків було отримано результати, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок цих аспектів

із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху. Для вивчення механізмів руйнування або втрати цілісності було досліджено вплив вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротиловим еквівалентом заряду m (TNT) = 30 кг, та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні огороження укриття $L = 0,5$ м [1–5].

Місця де виникає ініціація попередніх напружень

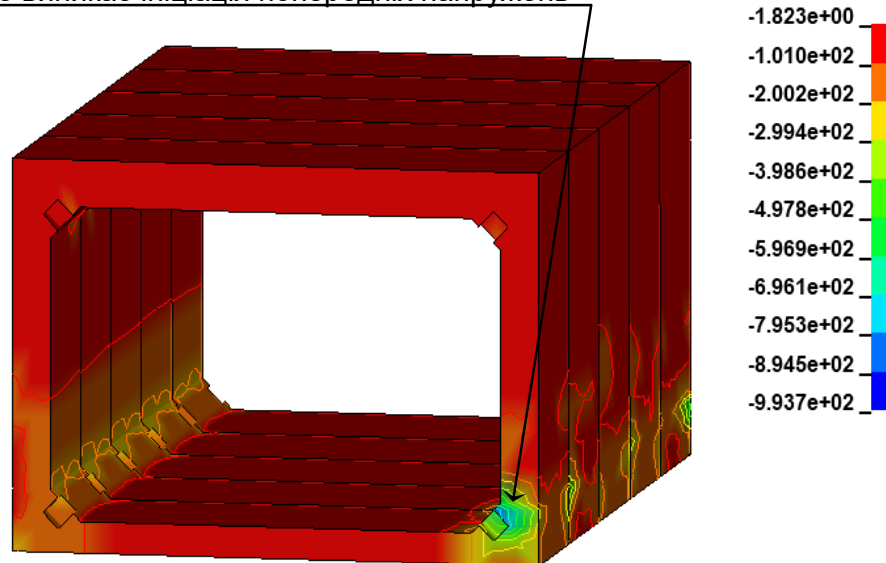


Рисунок 12 – Розподіл третіх головних напружень у бетонних елементах системи (Па) після ініціації попереднього напруження через силу затягування болтового з'єднання

Як описано вище, навантаження системи відбувалося в два етапи. На першому етапі прикладалося навантаження ініційованого попереднього напруження у з'єднувальних болтах через силу затягування та гравітаційного навантаження від власної ваги елементів системи. На рис. 12 представлено розподіл третього головного напруження у бетонних елементах системи, на якій можна прослідкувати

виникнення напружень у місцях анкерування бетонних блоків.

На рис. 12 можна побачити, що у місцях анкерування від ініціації попередніх напружень через силу затягування болтових з'єднань виникають помітні напруження стискання.

На рис. 13 представлено розподіл перших головних напружень у бетонних блоках від прикладеного гравітаційного навантаження перед прикладенням навантаження від вибухової хвилі.

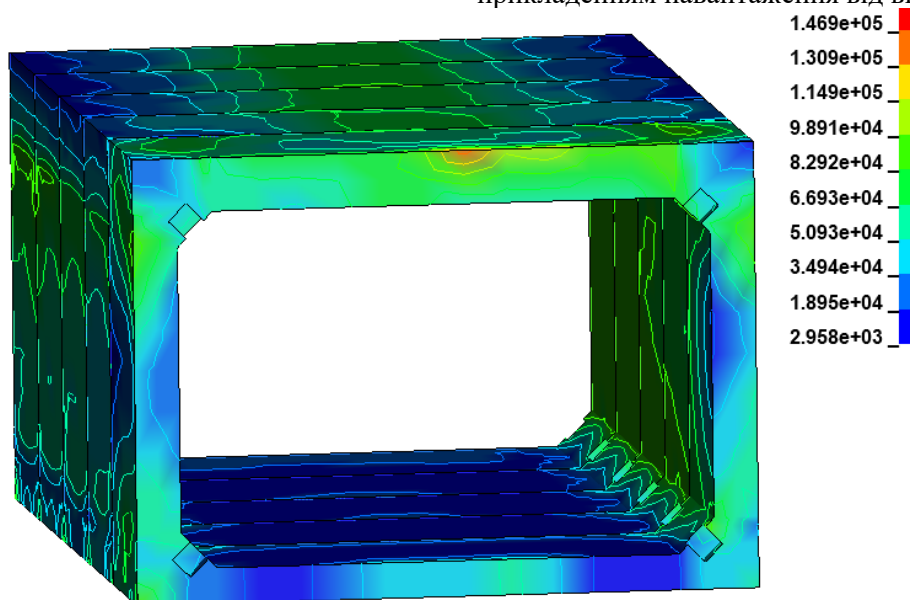


Рисунок 13 – Розподіл перших головних напружень у бетонних елементах системи (Па) після прикладання гравітаційного навантаження

На рис. 14 представлено розподіл перших головних напружень у ґрунті від прикладеного гравітаційного навантаження перед впливом вибухової хвилі.

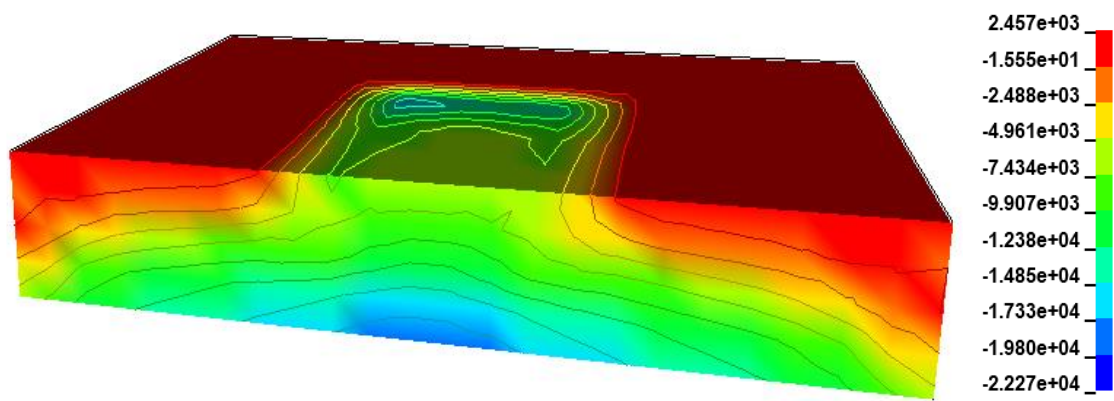


Рисунок 14 – Розподіл перших головних напружень у ґрунті (Па) після прикладання гравітаційного навантаження

На рис. 12–14 можна побачити, що від прикладання попередніх навантажень в елементах системи ініціюється напружено-деформований стан і до системи може бути прикладене навантаження від вибухової хвилі.

Для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано розподіл пластичних деформацій

після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з бічної сторони укриття. Побудований розподіл представлений на рис. 15.

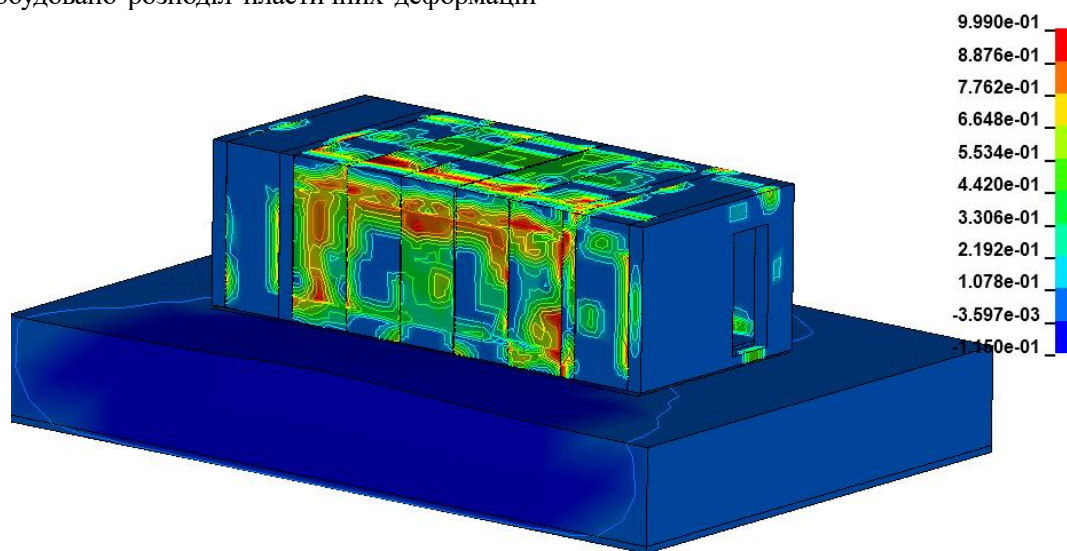


Рисунок 15 – Розподіл пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі (m (TNT) = 30 кг, $L = 0,5$ м, $p_{\max} = 56,4$ МПа) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з бічної сторони укриття

Зображення на рис. 15 показує, що під впливом вибуху ґрунт спучився, залізобетонні блоки піднялися на певну висоту над ґрунтом, а потім опустилися на нього. Проте можна зазначити, що вплив вибухової хвилі не призводить до руйнування самих бетонних блоків або їх перекидання. Характер руйнувань дозволяє припустити, що вони відбулися під впливом тиску ударної хвилі вибуху та сейсмічної хвилі, спровокованої вибухом, що спричинила

нерівномірний рух залізобетонних блоків і як наслідок – руйнування болтових з'єднань.

Також для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано розподіл пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині. Побудований розподіл представлений на рис. 16.

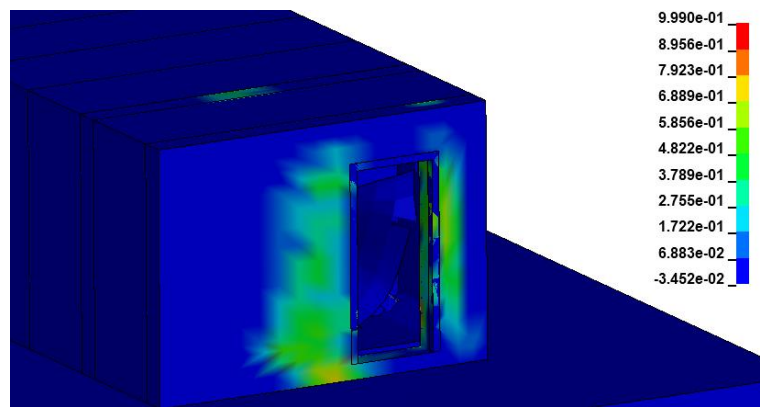


Рисунок 16 – Розподіл пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі ($m(\text{TNT}) = 30 \text{ кг}$, $L = 0,5 \text{ м}$) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з торцевої поверхні укриття, ближче до дверей

Зображення на рис. 16 показує, що під впливом вибуху ґрунт спучився, металеві двері сильно деформувалися, а залізобетонні блоки піднялися на певну висоту над ґрунтом і потім опустилися на нього. Роз'єднання залізобетонних блоків внаслідок руйнування болтових з'єднань не відбулося. Також, можна зазначити, що вплив вибухової хвилі не призводить до руйнування самих бетонних блоків або їх перекидання. Характер руйнувань також дозволяє припустити, що вони відбулися під впливом тиску ударної хвилі вибуху та сейсмічної хвилі, спровокованої

вибухом, що спричинила нерівномірний рух залізобетонних блоків і як наслідок – руйнування болтових з'єднань [1, 3].

Також для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано розподіл пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині. Побудований розподіл представлений на рис. 17.

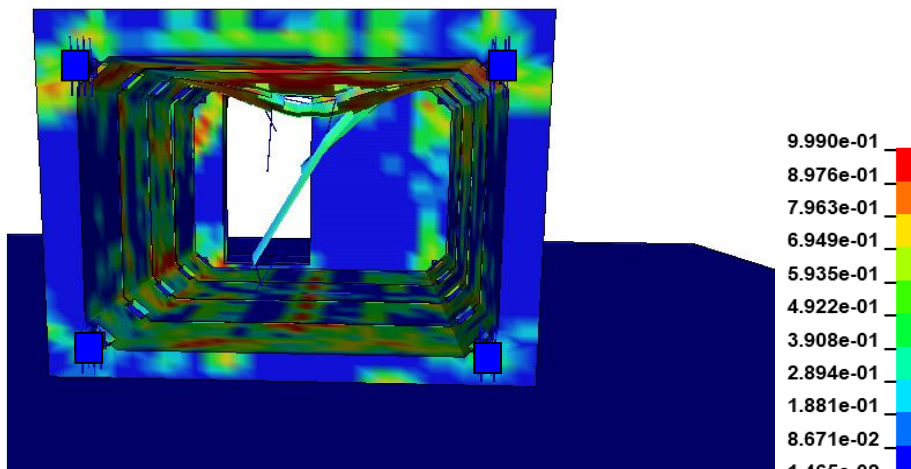


Рисунок 17 – Розподіл пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі ($m(\text{TNT}) = 30 \text{ кг}$, $L = 0,5 \text{ м}$) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині

Зображення на рис. 17 показує, що під впливом вибуху ґрунт не спучився, металеві двері не деформувалися, а залізобетонні блоки не піднімалися на певну висоту над ґрунтом. Роз'єднання залізобетонних блоків не відбулося внаслідок руйнування болтових з'єднань. Також, можна зазначити, що вплив вибухової хвилі призводить до руйнування самих бетонних блоків. Різниця характеру руйнування укриття зумовлена тим, що укриття вільно опирається на ґрунт і кінетична енергія, надана елементам

системи, витрачається не на їх деструкцію, а на надання імпульсу, що призводить до їх руху.

Висновки

В статті обґрунтовано та реалізовано розрахунково-теоретичний підхід до оцінки функціональної придатності захисних споруд (укриттів) модульного типу та елементів інженерного захисту при застосуванні засобів повітряного нападу противника та впливу ударної хвилі вибуху.

Встановлено закономірності взаємозв'язку між параметрами вибуху та стійкістю конструктивних елементів захисних споруд (зокрема стін з бетонних лего-блоків), що має важливе значення для оцінки їх залишкової захисної здатності.

Використання сучасних методів числового моделювання (метод скінченних елементів, явний метод інтегрування рівнянь динаміки, моделі контактної взаємодії та нелінійні моделі матеріалів) дало змогу отримати уявлення щодо механізмів руйнування та показників втрати цілісності захисних конструкцій внаслідок впливу вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротилівим еквівалентом заряду m (TNT) = 718,2 кг.

Досліджено механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій модульного укриття і встановлено взаємозв'язок цих аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху із максимально небезпечним поєднанням параметрів вибуху із тротилівим еквівалентом заряду m (TNT) = 30 кг та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні огороження укриття $L = 0,5$ м. Отримано розподіли пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкції укриття з бічної сторони, з торцевої сторони (ближче до дверей) та над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині.

Запропоновані методики можуть бути застосовані для вдосконалення проектних рішень нових захисних споруд, модернізації та експлуатації існуючих, а також для розробки нормативних документів у сфері цивільного захисту.

Список літератури:

1. Толок І. В., Рибка Є. О., Поздєєв С. В., Кустов М. В., Новгородченко А. Ю., Пліско Ю. В. Закономірності поведінки залізобетонних конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху. *Problems of Emergency Situations*. 2024. № 2(40). С.258-268.
2. Некора В., Ніжник В., Поздєєв С., Луценко Ю., Михайлов В. Особливості та перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. Вип. 1(15). С.149–157.
3. Поздєєв С., Новгородченко А., Шналь Т., Яковчук Р., Тур Н. Математичне моделювання розрахункових схем конструкцій модульного захисного укриття. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні*

ситуації: попередження та ліквідація». 2023. Том 7 № 2. С. 183-192.

4. Поздєєв С., Куліца О., Трошкін С., Панченко П., Сагдієв М. Прогнозування виникнення аварійної ситуації в мобільній котельні. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. 7 (1), С. 107-118.

5. Шарко О., Поздєєв С., Ніжник В., Святошенко С., Новгородченко О. Модульне захисне укриття. Патент на корисну модель № 155567. Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 13.03.2024.

6. Захисні споруди цивільного захисту: ДБН В.2.2-5 :2023. [Чинний від 2023-11-01]. Міністерство розвитку громад та територій України, 2023. 130 с.

7. Unified facilities criteria (UFC). Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC 3-340-02. [Чинний від 2002-12-05]. 2002. 1940 с.

8. Sadkovyi V., Andronov V., Semkiv O., Kovalov A., Otrosh Yu., Udianskyi M., Koloskov V., Danilin A., Kovalov P. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Monograph. Kharkiv: PC Technology center, 2021. 180 p.

9. Nekora V., Pozdieiev S., Nekora O., Fedchenko S., Novhorodchenko A., Shnal T. Determining The Behavior of A Glass Panel Under Heating Conditions During A Fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. 1(1(133)). P. 52–61.

10. Nesukh M., Subota A., Shvidenko A., Nekora O., Kulitsa O., Kropyva M. Determining dynamic processes in a tank after its separation from the bottom during a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. 1/7 (133). P. 99–112.

11. Almazov K., Pozdieiev S., Tarasenko O., Kulitsa O., Kalynovskyi A., Chornomaz I. Determining the Stability of A Fire Truck Tanker Against Overturning While Driving Through Crossed Forest Terrain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 6(7(132)). P.75–86.

12. Otrosh Yu., Rybka E., Danilin O., Zhuravskyi M. Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. *E3S Web of Conferences* 123, 01012. Ukrainian School of Mining Engineering. 2019. P. 1–10. doi: 10.1051/e3sconf /201912301012/

13. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 708. №012065. P. 1–6. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012065.

14. Kovalov A., Otrosh Yu., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of determination method for strength characteristics of reinforcing steel by using thread cutting method after

temperature influence. *Materials Science Forum*. 2020. V. 1006. P. 179–184.

15. Otrosh Y., Kovalov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V.230. 02023. P. 1–7. doi: 10.1051/mateconf/201823002023.

16. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*. 2018. V.60. 00003. P. 7–16. doi: 10.1051/e3sconf/20186000003.

17. Kovalov A., Otrosh Y., Vedula S., Danilin O., Kovalevska T. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. V.3 P.46–53. doi:10.29202/nvngu/2019-3/9.

18. Nizhnyk V., Pozdieiev S., Nekora V., Teslenko O. Substantiation of the Method for Studying the Behavior of Enclosing Structures with Glazing Under Conditions of Fire Thermal Influence. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 438. 2024. P. 273–285.

19. Pozdieiev S., Sidnei S., Nekora O., Subota A., Kulitsa O. Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. 808 LNNS, P. 447–457.

20. Pozdieiev S., Tarasenko O., Almazov K., Nekora V. Research of Dynamic Process in Water Cistern of Fire Automobile During Its Moving Along Rough Woodland. *Mechanisms and Machine Science*. 2023. 125 MMS, P. 1216–1223.

References:

1. Tolok, I. V., Rybka, Ye. O., Pozdieiev, S. V., Kustov, M. V., Novhorodchenko, A. Yu., & Plisko, Yu. V. (2024). Regularities of behavior of reinforced concrete structures of modular shelters under explosion conditions. *Problems of Emergency Situations*, 2(40).

2. Nekora, V., Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., Lutsenko, Yu., & Mykhailov, V. (2023). Features and prospects of effective functioning of civil protection shelters under combat conditions. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(15), 149–157.

3. Pozdieiev, S., Novhorodchenko, A., Shnal, T., Yakovchuk, R., & Tur, N. (2023). Mathematical modeling of design schemes of modular protective shelter structures. *Extraordinary Situations: Prevention and Elimination*, 7(2), [pages]. Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine.

4. Pozdieiev, S., Kulitsa, O., Troshkin, S., Panchenko, P., & Sagdiiev, M. (2023). Forecasting of emergency situations in a mobile boiler house. *Extraordinary Situations: Prevention and Elimination*, 7(1), 107–118.

5. Sharko, O., Pozdieiev, S., Nizhnyk, V., Sviatoshenko, S., & Novhorodchenko, O. (2024). Modular protective shelter. Utility Model Patent of Ukraine № 155567. Registered in the State Register of Utility Models of Ukraine on March 13, 2024.

6. DBN V.2.2-5:2023. Civil Protection Shelters. [Ukrainian State Building Code].

7. UFC 3-340-02. Unified Facilities Criteria (UFC). Structures to resist the effects of accidental explosions. (2008).

8. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Otrosh, Yu., Udianskyi, M., Koloskov, V., Danilin, A., & Kovalov, P. (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC Technology Center.

9. Nekora, V., Pozdieiev, S., Nekora, O., Fedchenko, S., Novhorodchenko, A., & Shnal, T. (2025). Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1(133)), 52–61.

10. Nesukh, M., Subota, A., Shvidenko, A., Nekora, O., Kulitsa, O., & Kropyva, M. (2025). Determining dynamic processes in a tank after its separation from the bottom during a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7(133)), 99–112.

11. Almazov, K., Pozdieiev, S., Tarasenko, O., Kulitsa, O., Kalynovskyi, A., & Chornomaz, I. (2024). Determining the stability of a fire truck tanker against overturning while driving through crossed forest terrain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7(132)), 75–86.

12. Otrosh, Yu., Rybka, E., Danilin, O., & Zhuravskyi, M. (2019). Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. *E3S Web of Conferences*, 123, 01012. doi:10.1051/e3sconf/201912301012.

13. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., & Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influence conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012065. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012065.

14. Kovalov, A., Otrosh, Yu., Rybka, E., Kovalevska, T., Togobytska, V., & Rolin, I. (2020). Treatment of determination method for strength characteristics of reinforcing steel by using thread cutting method after temperature influence. *Materials Science Forum*, 1006, 179–184.

15. Otrosh, Y., Kovalov, A., Semkiv, O., Rudeshko, I., & Diven, V. (2018). Methodology of remaining lifetime determination of building structures. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02023. doi:10.1051/mateconf/201823002023.
16. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., & Savchenko, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. *E3S Web of Conferences*, 60, 00003. doi:10.1051/e3sconf/20186000003.
17. Kovalov, A., Otrosh, Y., Vedula, S., Danilin, O., & Kovalevska, T. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 46–53. doi:10.29202/nvngu/2019-3/9.
18. Nizhnyk, V., Pozdieiev, S., Nekora, V., & Teslenko, O. (2024). Substantiation of the method for studying the behavior of enclosing structures with glazing under conditions of fire thermal influence. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 438, 273–285.
19. Pozdieiev, S., Sidnei, S., Nekora, O., Subota, A., & Kulitsa, O. (2023). Study of the destruction mechanism of reinforced concrete hollow slabs under fire conditions. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 808, 447–457.
20. Pozdieiev, S., Tarasenko, O., Almazov, K., & Nekora, V. (2023). Research of dynamic process in water cistern of fire automobile during its moving along rough woodland. *Mechanisms and Machine Science*, 125, 1216–1223.

© С. В. Поздєєв, А. П. Гаврись, Н. Ю. Тур,
Р. С. Яковчук, О. В. Любовецький, 2025.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 23.10.2025.

Прийнято до публікації 26.11.2025.