

УДК 699.8

- І. В. Толок, к.пед.н., доцент, ректор (ORCID 0000-0001-6309-9608)*
Є. О. Рибка, д.т.н., професор, т.в.о. проректора (ORCID 0000-0002-5396-5151)
С. В. Поздєєв, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-9085-0513)
М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. наук. від. (ORCID 0000-0002-6960-6399)
А. Ю. Новгородченко, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0003-2347-093X)
Ю. В. Пліско, ст. методист факультету (ORCID 0009-0005-9526-1119)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МОДУЛЬНИХ УКРИТТІВ В УМОВАХ ВИБУХУ

Наведені результати математичного моделювання впливу вибуху та отриманого напружено-деформованого стану у залізобетонних конструкціях модульного укриття. А також встановлено відповідність укриттів умовам безпеки, що вимагаються діючими нормами України. Для цього було досліджено поведінку огорожувальних конструкцій наземних модульних укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання, що гарантує безпеку людей, які знаходяться всередині укриттів та їх захисту від наслідків повітряних обстрілів. В науковому дослідженні були отримані результати, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху під час ворожих обстрілів. Результати дослідження були отримані завдяки розробці нового підходу щодо розрахунків, заснованих на застосуванні величини бойового заряду відповідного снаряду у тротиловому еквіваленті, дистанції вибуху та положення точки, де відбувається вибух. Відповідні розрахунки були використані в програмному комплексі LS-DYNA, де математично описувалась поведінка залізобетонних конструкцій укриття в умовах навантаження, також використовувалися математичні співвідношення теорій міцності й пластичності. І визначений тиск за даними параметрами може бути застосований для вивчення його впливу на конструкції. Були отримані результати математичного моделювання поведінки захисних укриттів в умовах вибуху, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху. Реалізація результатів дослідження це представлення технічних пропозицій щодо модульних укриттів для захисту населення від уражень, спричинених бойовими діями.

Ключові слова: модульне укриття, залізобетонні конструкції, напружено-деформований стан, математичне моделювання, вплив вибухів

1. Вступ

В сучасних умовах при веденні бойових дій в Україні гостро постає проблема функціонування модульних укриттів в умовах обстрілів та дослідження впливу вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів від ймовірних обстрілів. Тому є актуальним питанням дослідження поведінки конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху та проведення відповідних розрахунків.

Ефективність захисних укриттів під час ворожих обстрілів є здатність їхніх будівельних конструкцій зберігати свої огорожувальні функції в умовах бойових дій, блокувати вплив вражаючих факторів з причини авіаційних, ракетних та артилерійських обстрілів, а також захищати від ураження людей уламками та осколками будівельних конструкцій. А також забезпечувати можливість безпечної евакуації людей з укриттів після руйнування будівельних конструкцій об'єктів, що знаходяться поряд із ними, у зв'язку із влучання в них бойових снарядів. У даних умовах вкрай необхідне вивчення поведінки огорожувальних конструкцій захисних споруд та укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання, та гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів.

Це є актуальним питанням, адже сучасна будівельна галузь та досвід зарубіжних підходів свідчать про можливість використання наземних захисних укриттів модульного типу, перевагою яких є зменшення часу укриття населення під час ворожих ударів. Результати роботи стануть передумовою для подальших досліджень в частині обґрунтування конструктивних параметрів приміщень безпеки житлових і громадських будівель в умовах воєнного стану. Також стануть в нагоді для проектних організацій під час проектування захисних споруд цивільного захисту та наглядових органів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Конструювання модульних захисних укриттів в Україні є дуже актуальною темою, проте це питання малодосліджене і дані відомості щодо проектування чи розрахункових методик є закриті від загалу. В роботах [1, 2] наведено основні результати досліджень щодо забезпечення вимог об'ємно-планувальних рішень та розглянуті перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. Проте залишається невирішені питання, пов'язані з формуванням захисних властивостей та критеріїв не лише для підземних захисних споруд, а також потрібно конкретно визначити ці критерії для наземних укриттів. Причинами цього може бути те, що до повномасштабного вторгнення здебільшого використовувалися підземні захисні споруди.

Варіантом подолання відповідних недоліків є активізація питання дослідження та проектування наземних модульних укриттів. Цікавий підхід використаний в роботі [3], де захисне укриття призначене для внутрішнього захисту приміщень і може бути використане як для індивідуального користування, так і для загального користування цивільним населенням та військовими. Основною інновацією якого є можливість швидкого розгортання укриття однією людиною без використання додаткових інструментів чи зусиль, що робить його ідеальним для швидкого реагування в критичних ситуаціях. Проте в даному дослідженні не розглядаються модульні захисні укриття, які влаштовуються на вулиці з масовим перебуванням людей для забезпечення їхнього захисту під час повітряних обстрілів.

Більш детально наземні модульні укриття досліджуються в роботі [4], так само як наші розроблені укриття прості й надійні, мають низькі витрати на його зведення та високу швидкість монтажу, тому що містить корпус, виконаний з однотипних панельних модулів. Однак недостатньо досліджено вплив вибуху на модульні укриття і збереження цілісності залізобетонних конструкцій даних укриттів. Причиною цього може бути те, що у даних умовах експериментальне дослідження безпеки захисних укриттів є утрудненим з огляду на їх високу вартість, трудомісткість та підвищену небезпеку. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого сучасним методам математичного моделювання, що дозволяє дослідити всі фізико-механічні процеси, які відбуваються у конструкціях укриттів під час вибухів.

3. Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є визначення закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів, що встановлюються безпосередньо на ґрунт, в умовах вибуху під час повітряних обстрілів при веденні бойових дій на території України.

Для виконання цієї мети поставлені такі завдання дослідження:

1. Обґрунтувати математичні моделі поведінки залізобетонних конструкцій

укриттів в умовах вибуху.

2. Розробити методика числового експерименту щодо впливу вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів.

4. Матеріали та методи дослідження.

Об'єкт дослідження – функціонування модульного укриття в умовах обстрілів. Предмет дослідження – вплив вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів від ймовірних обстрілів. Гіпотеза – наявність закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів, які встановлюються безпосередньо на ґрунт, в умовах вибуху під час повітряних обстрілів, що забезпечить безпеку практичного використання модульних укриттів відповідно до діючих вимог [5, 6]. В роботі використано методи комплексного аналізу щодо оцінювання наслідків від надлишкового тиску вибуху військових засобів ураження та методи математичного моделювання на основі явного методу інтегрування рівнянь динаміки і рівнянь напружено-деформованого стану твердого тіла при їх апроксимації за методом кінцевих елементів у нелінійній постановці.

Для практичної реалізації обґрунтованих математичних моделей під час проведення розрахунків було використано комп'ютерна система LS-DYNA. Вона підходить для нашого дослідження, тому що призначена для моделювання імпульсних впливів на конструктивні системи й моделювання результату цих впливів з використанням рівнянь динаміки в кінцево-елементній реалізації, контролю контакту й зусиль відклику на контактну взаємодію за допомогою методу штрафних функцій, динамічного перебудування сітки кінцевих елементів при її резонінгу й поділу на окремі частини, здатні до подальшої контактної взаємодії. Можливості LS-DYNA для опису властивостей залізобетону дозволяють використання як суцільного матеріалу з арматурними включенням, так і додаткову умову анізотропії й модифікованої міцності матеріалу, розподілене по всьому об'єму. Також є можливість представлення арматурних стержнів за допомогою окремих типів елементів – балкових або об'ємних. Істотною перевагою системи LS-DYNA є те, що елементи різних типів не обов'язково повинні сполучатися у спільних вузлах, що суттєво спрощує побудову кінцево-елементних схем.

Згідно із [5] захисні властивості захисних споруд виражаються такими основними критеріями як надмірний тиск повітряної ударної хвилі, ступінь послаблення (коефіцієнт захисту K_3). Залежно від зазначених критеріїв захисні споруди поділяються на класи сховищ та групи протирадіаційних укриттів, зазначені в табл. 1 і 2 [7].

Табл. 1. Класи сховищ

№	Клас сховища	Надмірний тиск повітряної ударної хвилі ΔP_{ϕ} , кПа	Ступінь послаблення (коефіцієнт захисту K_3)
1	A-I	500	5000
2	A-II	300	3000
3	A-III	200	5000
4	A-IV	100	1000

Настановами щодо проектування захисних споруд, що рекомендуються у нормах [5, 6], чинних в Україні, у якості основного впливу визначається надлишковий тиск ударної хвилі. Даний тиск визначається як довідникова величина і є силовим фактором що прикладається до поверхонь будівельних конструкцій бомбосховища. При цьому для врахування динамічності прикладання навантаження застосовуються відповідні коефіцієнти. Даний підхід є дещо застарілим, оскільки

для розрахунку використовує квазістатичний підхід. Для більш точного описання пропонується застосовувати більш фізично обґрунтований підхід, що заснований на застосуванні величини бойового заряду відповідного снаряду у тротиловому еквіваленті, дистанції вибуху та положення точки, де відбувається вибух. Визначений тиск за даними параметрами може бути використаний для вивчення його впливу на конструкції [6, 7].

Табл. 2. Група протирадіаційного укриття

№	Група ПРУ	Надмірний тиск повітряної ударної хвилі ΔP_{ϕ} , кПа	Ступінь послаблення (коефіцієнт захисту K_z)
1	П-1	100	1000
2	П-2	20	500
3	П-3	-	500
4	П-4	20	200
5	П-5	-	200
6	П-6	-	100

Запропоновані модульні укриття складається із двох вхідних отворів (металеві двері) та залізобетонної капсули, яка конструюється з модульних блоків, які з'єднані між собою за допомогою зварювання закладних деталей. Такі блоки встановлюють на ґрунт без фундаментних та підкріплювальних конструкцій. Конструктивна схема укриття у вигляді ізометричної проєкції наведена на рис. 1.

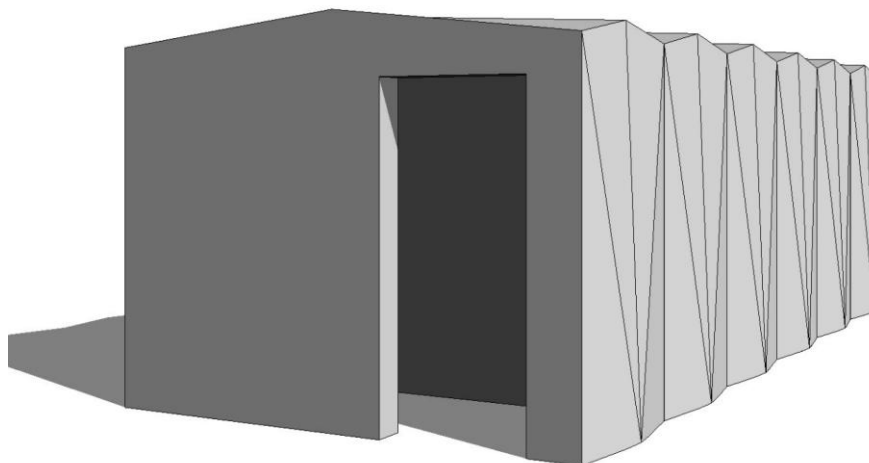


Рис. 1. Конструктивна схема укриття

Запропонована конструктивна система модульного укриття дозволяє забезпечувати його захисні функції в умовах вибуху без руйнування або перекидання його залізобетонних блоків.

5. Визначення закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів в умовах вибуху

5.1. Обґрунтування математичної моделі поведінки залізобетонних конструкцій укриттів в умовах вибуху

Для моделювання впливу вибуху та відповідного напружено-деформованого стану у залізобетонних конструкціях модульних укриттів в умовах вибуху, був застосований узагальнений інженерний підхід, який показаний в табл. 3 [8].

В програмному комплексі LS-DYNA математичний опис феноменології поведінки матеріалу в умовах навантаження (змінюється від нуля до значень, які

можуть бути порівнянні із граничними, або перевищувати їх) називається математичною моделлю або просто моделлю матеріалу. Сюди входять математичні співвідношення теорій міцності й пластичності.

Табл. 3. Узагальнений інженерний підхід розрахунку

№	Особливості механічних процесів	Математична модель або методи
1.	Напружено-деформований стан твердого тіла.	Інтегрування рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану за допомогою метода кінцевих елементів
2.	Моделювання бетонної основи та шару ґрунту блоків укриття.	Застосування тривимірних масивних кінцевих елементів гексаедричної форми із вісьмома вузлами
3.	Моделювання сталевих пластинчастих елементів системи анкерування та елементів дверей.	Використання двовимірних оболонкових кінцевих елементів прямокутної форми із чотирма вузлами та п'ятьма точками інтегрування
4.	Моделювання сталевий арматури у вигляді арматурних стержнів.	Використання одновимірних лінійних елементів із визначеною формою перерізу, стержньові балкові елементи
5.	Описання нелінійної поведінки бетону в умовах діючих навантажень.	Застосування пластичної моделі ушкодженого бетону, яка будується на основі нелінійних діаграм деформування із спадними гілками
6.	Моделювання нелінійної поведінки ґрунту.	Застосування моделі Друкера – Прагера
7.	Взаємодія між поверхнями спірання залізобетонних блоків захисного укриття на ґрунт.	Використання моделі контактної взаємодії
8.	Моделювання вибуху і визначення зміни тиску на стінки залізобетонних блоків укриттів.	Застосування моделі Тейлора
9.	Програмний код для процесу випробування зразка	Використання комп'ютерної системи LS-DYNA є частиною комплексу розрахункових інженерних систем ANSYS Workbench і також входить як блок в окрему частину цього комплексу ANSYS APDL

При описанні бетону використана модель неперервної поверхні руйнування з обмежуючим куполом, що має номенклатурне позначення в системі LS-DYNA як CSCM type № 159 (Continuous Surface Cap Model), яка описана на роботах Murray, Abu-Odeh і Bligh [9, 10]. Основною особливістю даної моделі є те, що комбінації напружень, при якому матеріал здатний опиратися, обмежені особливою поверхнею, яка скомпонована з поверхні текучості й крихкого руйнування. Тобто дана поверхня охоплює всі випадки руйнування бетону комплексно й установлює тим самим умови або крихкого або в'язкого руйнування.

5.2. Розробка методики числового експерименту щодо впливу вибуху на залізобетонні укриття

На рис. 2 показано декілька варіантів розташування епіцентру вибуху: посередині бокової поверхні укриття, на торці збоку входу в укриття та над верхньою плитою укриття [7, 9].

Після проведення всіх розрахунків, відповідно розроблених методик, була отримана кінцево-елементна схема укриття наведена на рис. 3. На даній схемі відображена кінцево-елементна дискретизація всіх компонентів-частин математичної моделі укриття [8, 10].

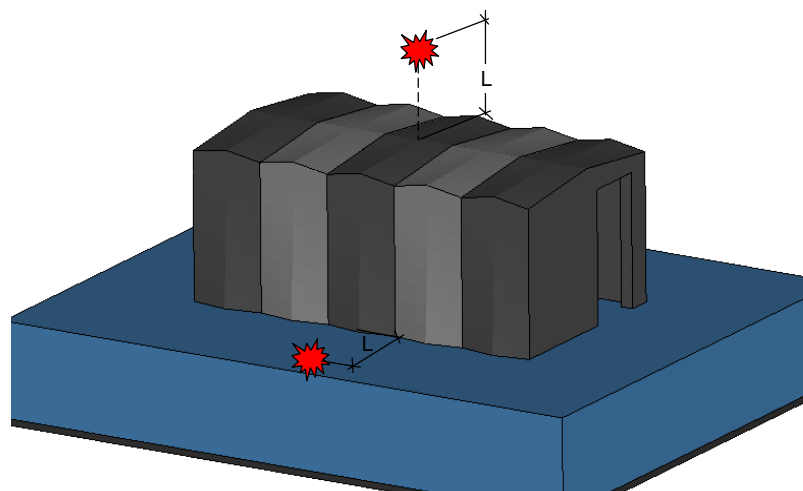


Рис. 2. Схеми різних варіантів розташування епіцентру вибуху

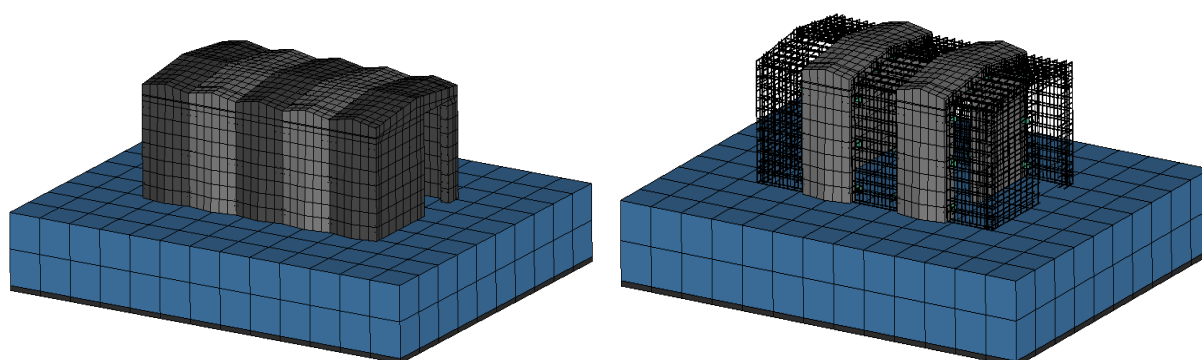


Рис. 3. Кінцево-елементна схема компонентів укриття

Отримані результати дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху. Для вивчення механізмів руйнування або втрати цілісності було досліджено вплив вибуху за сценаріями, поданими на рис. 2 із максимально небезпечним сполученням параметрів вибуху із тротиловим еквівалентом заряду 30 кг, та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні огороження укриття 0,5 м. За таких умов максимальний тиск на поверхню огороження захисного укриття та поверхню ґрунту складає 56,4 МПа.

Для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано картину розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з боку бічної сторони укриття, детально показана на рис. 4 [11].

Також для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано картину розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині, що зображено на рис. 5 [12, 13].

Аналіз отриманих результатів 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 унаслідок руйнування болтових з'єднань. Також, можна зазначити, що вплив вибухової хвилі призводить до руйнування самих бетонних блоків.

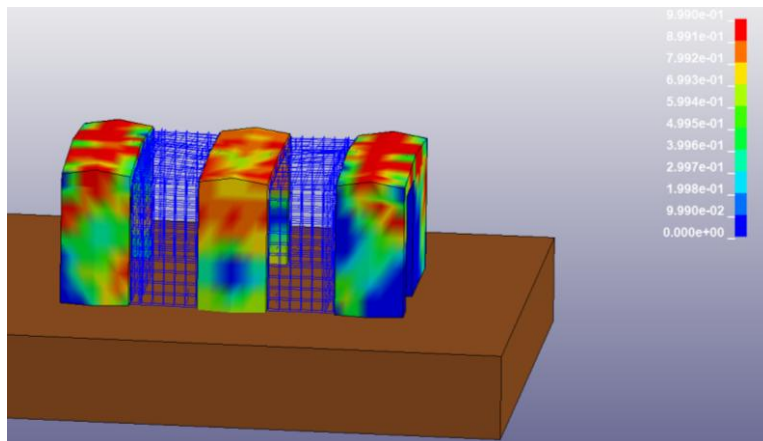


Рис. 4. Розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі ($m(\text{TNT}) = 30$ кг, $L = 0,5$ м, $p_{\max} = 56,4$ МПа) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з боку бічної сторони укриття

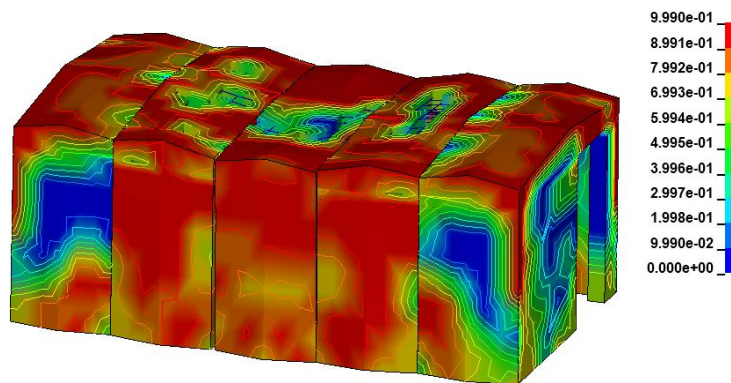


Рис. 5. Розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі ($m(\text{TNT}) = 30$ кг, $L = 0,5$ м, $p_{\max} = 56,4$ МПа) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині

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 їм імпульсу, що призводить до їх руху. Тому виявлено, що найбільш небезпечні сценарії це вплив вибуху на бокову та верхню горизонтальну поверхні укриття.

6. Обговорення результатів дослідження поведінки залізобетонних конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху

За результатами аналізу конструктивних систем захисних укриттів було обґрунтовані основні положення та припущення розрахунково-теоретичного підходу щодо математичного моделювання впливу вибуху на залізобетонних будівельних конструкцій захисних споруд розроблених укриттів модульного типу, які детально показані в табл. 3. Були обґрунтовані розрахункові схеми та набір математичних моделей механічної взаємодії між елементами захисних укриттів, матеріалів конструкцій та ґрунту, на яких вони встановлюються, а також моделі механічного впливу вибуху на ґрунті та елементи укриття, наведені на рис. 1 – рис. 3. На основі проведеного математичного моделювання зроблено висновок про безпеку захисних укриттів запропонованої конструкції при їх практичному застосуванні для захисту від вибухів та проникаючого іонізуючого випромінювання.

Відповідно розрахунків запропонована конструктивна система модульного укриття дозволяє забезпечувати його захисні функції в умовах вибуху без руйнування або перекидання його залізобетонних блоків. Тому дане укриття за своїми захисними функціями (зберігання міцності, цілісності та відсутність перекидання або інших суттєвих переміщень) забезпечує вимоги чинних норм України до захисних споруд, що встановлюють необхідний рівень захисту. Дані модульні укриття є безпечними при їх практичному використанні для захисту населення від впливу вибухів із надлишкового тиску 100 кПа (10 тс/м^2) та маси вибухівки 10 кг у TNT еквіваленті під час повітряних обстрілів, а також проникаючого іонізуючого випромінювання.

Ефективність даного математичного моделювання полягає в розробці математичного апарату розрахунку впливу вибуху з різних сторін на конструкції модульних укриттів, що в свою чергу є не таким трудомістким і дороговартісним методом, ніж натурні випробування, реальні умови яких важко забезпечити в умовах війни в Україні. Варто зазначити, що є потреба подальших наукових досліджень, таких як залежність захисних властивостей огорожувальних конструкцій модульних укриттів від характеристик заряду сучасних військових засобів ураження для удосконалення розрахунків даного математичного моделювання. Таким чином, було отримано результати, які дозволять в майбутньому дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху.

7. Висновки

1. Дослідження та обґрунтування математичних моделей поведінки конструкцій укриттів при вибуху дало можливість встановити, що руйнівна здатність сучасних військових засобів ураження залежить від їх характеристик заряду бойової частини, який може бути виражений в тротиловому еквіваленті. Захисні властивості огорожувальних конструкцій захисних споруд цивільного захисту залежать від матеріалу, з якого виконані такі огорожувальні конструкції та його товщини. Варто зазначити, що залежність захисних властивостей огорожувальних конструкцій захисних укриттів цивільного захисту від характеристик заряду сучасних військових засобів ураження, потребує подальших наукових досліджень.

2. За допомогою розробки методики числового експерименту щодо впливу вибуху на модульні укриття було встановлено відповідності модульних укриттів даної конструкції умовам безпеки, що висувається діючими нормами, чинними в Україні. Також змодельовано поведінку огорожувальних конструкцій модульних укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання щодо гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів. В дослідженні проаналізовано та систематизовано впливи від бойових зарядів на конструкції укриттів і запропоновано формалізувати та описувати їх за моделлю ударної хвилі сферичної форми з відповідністю її до стандартних значень надлишкового тиску вибуху. Запропоновано для розрахунку деформування конструкцій укриття і ґрунту використовувати комплекс математичних моделей на основі апроксимації диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану методу кінцевих елементів у реалізації за явним методом. За результатами проведених досліджень було встановлено, що захисні укриття запропонованої конструкції є безпечними при їх практичному використанні для захисту населення від впливу вибухів із надлишкового тиску 100 кПа

(10 тс/м²) та маси вибухівки 10 кг у TNT еквіваленті під час повітряних обстрілів, а також проникаючого іонізуючого випромінювання для гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів.

Література

1. 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. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15). С. 149–157

2. Спосіб влаштування захисної споруди (укриття) в населених пунктах для захисту цивільного населення: пат. 154965 Україна Е04Н9/00. № u202301260; заяв. 27.03.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. № 2/2024. 2 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1779578/>

3. Багатоцільове мобільне збірно-розбірне захисне укриття: пат. 156538 Україна. Е04Н9/00. № u202303385; заяв. 10.07.2023; опубл. 10.07.2024, Бюл. № 28/2024. 5 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1808189/>

4. Модульне захисне укриття: пат. 153093 Україна. Е04Н9/00. № u202204625 заяв. 07.12.2022; опубл. 17.05.2023, Бюл. № 20/2023. 5 с. UA 153093 <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1736942/>

5. ДСТУ 9195:2022 «Швидкосторуджувані захисні споруди цивільного захисту модульного типу». Чинний від 06 грудня 2022 р. Вид. офіц. Київ ДП «УкрНДНЦ», 2023. 15 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99454.

6. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». Чинний від 01.11.2023. Вид. офіц. Київ Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666

7. Гетун Г., Безклубенко І., Соломін А., Баліна О. Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2023. Вип. 67. С. 203–220. doi: 10.32347/2077-3455.2023.67.203-220

8. Novhorodchenko A., Shnal T., Yakovchuk R., Tur N. The study of the behavior of reinforced concrete structures of modular shelter in conditions of explosion. Proceedings of CEE 2023 Civil and Environmental Engineering and Architecture. Springer/Rzeszów, Poland. 2023. P 286–295. URL: <https://www.springerprofessional.de/En/the-study-of-the-behavior-of-reinforced-concrete-structures-of-m/26223376>

9. Murray Y.D., A. Abu-Odeh R. Bligh Evaluation of concrete material model 159, FHWA-HRT-05-063. 2007. P. 209. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/05063/05063.pdf>

10. Hallquist J.O. LS-DYNA Theory Manual, Livermore software technology corporation: Livermore California / Copyright, USA March, 2006. 680 p. URL: https://www.egr.msu.edu/decs/sites/default/files/content/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf

11. Jonsson P., Jonsén P., Andreasson P., Lundström T., Hellström J. Modelling dam break evolution over a wet bed with smoothed particle hydrodynamics: A Parameter Study. JOURNAL NAME: Engineering. 2015. Vol. 7. № 5. P. 248–260. doi: 10.4236/eng.2015.75022

12. Baker T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden. 2009. URL:

https://www.researchgate.net/publication/200634854_Collapse_Analysis_of_Masonry_Structures_under_Earthquake_Actions

13. Aagaard B. T., Knepley M. G., Williams C. A. A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. P. 3059–3079. doi: 10.1002/jgrb.50217

I. Tolok, PhD, Associate Professor, Rector
E. Rybka, DSc, Professor, Acting Vice-Rector
S. Pozdieiev, DSc, Professor, Professor of the Department
M. Kustov, DSc, Professor, Deputy Head of Department
A. Novhorodchenko, PhD, Lecturer of the Department
Y. Plisko, Senior Methodologist of the Faculty
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

BEHAVIOR PATTERNS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF MODULAR SHELTERS IN EXPLOSION CONDITIONS

The results of mathematical modeling of the impact of the explosion and the resulting stress-strain state in reinforced concrete structures of a modular shelter are presented. The compliance of the shelters with the safety conditions required by the current standards of Ukraine is also established. For this purpose, the behavior of the enclosing structures of ground modular shelters under the effects of explosions and the action of penetrating ionizing radiation was investigated, which guarantees the safety of people inside the shelters and their protection from the effects of air strikes. The scientific study obtained results that allow investigating the mechanisms of destruction or loss of integrity of shelter structures and establishing the relationship between these aspects and ensuring the performance of its protective functions under the effects of an explosion during enemy shelling. The results of the study were obtained through the development of a new approach to calculations based on the use of the warhead of the corresponding projectile in TNT equivalent, the explosion distance and the position of the point where the explosion occurs. The corresponding calculations were used in the LS-DYNA software package, where the behavior of reinforced concrete shelter structures under load conditions was mathematically described, and mathematical relations of strength and plasticity theories were also used. And the pressure determined by these parameters can be used to study its impact on structures. The results of mathematical modeling of the behavior of protective shelters under explosion conditions were obtained, which allow us to investigate the mechanisms of destruction or loss of integrity of shelter structures and establish the relationship of these aspects with ensuring the performance of its protective functions under the influence of an explosion. The implementation of the research results is the presentation of technical proposals for modular shelters to protect the population from damage caused by combat operations.

Keywords: modular shelter, reinforced concrete structures, stress-strain state, mathematical modeling, impact of explosions

References

1. Nekora, V., Nizhnik, V., Pozdyeyev, S., Lucenko, Yu., Mihajlov, V. (2023). Osoblivosti ta perspektivi efektyvnoho funkcionuvannya zahisnih sporud civi-lnogo zahistu v umovah bojovih dij. *Naukovij visnik: Civilnij zahist ta po-zhezhna bezpeka*, (1(15)), 149–157. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15). C. 149–157.
2. Sposib vlashtuvannya zahisnoyi sporudi (ukrittya) v naselenih punktah dlya zahistu civilnogo naseleennya: pat. 154965 Ukrayina E04H9/00. № u202301260; zayav. 27.03.2023; opubl. 10.01.2024, Bul. № 2/2024. 2 Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1779578/>
3. Bagatocilove mobilne zbirno-rozbirne zahisne ukrittya: pat. 156538 Ukrayina. E04H9/00. № u202303385; zayav. 10.07.2023; opubl. 10.07.2024, Bul. № 28/2024. 5 Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1808189/>

4. Modulne zahisne ukrittuya: pat. 153093 Ukrayina. E04H9/00. № u202204625 zayav. 07.12.2022; opubl. 17.05.2023, Byul. № 20/2023. 5 s. UA 153093 Available at: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1736942/>

5. DSTU 9195:2022 “Quickly constructed protective structures of civil defense of modular type”. Effective from December 6, 2022. Official publication. Kyiv SE “UkrNDNTS”. (2023), 15. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99454

6. DBN V.2.2-5:2023 "Civil defense protective structures". Effective from 01.11.2023. Official publication. Kyiv Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666

7. Getun, G., Bezklubenko, I., Solomin, A., & Balina, O. (2023). Peculiarities of spatial planning solutions for civil defense protective structures. *Modern Problems of Architecture and Urban Planning*, (67), 203–220 doi: 10.32347/2077-3455.2023.67.203-220

8. Novhorodchenko, A., Shnal, T., Yakovchuk, R., Tur, N. (2023) The study of the behavior of reinforced concrete structures of modular shelter in conditions of explosion. *Proceedings of CEE 2023 Civil and Environmental Engineering and Architecture*. Springer/Rzeszów, Poland, 286–295. Available at: <https://www.springerprofessional.de/En/the-study-of-the-behavior-of-reinforced-concrete-structures-of-m/26223376>

9. Murray, Y. D., A. Abu-Odeh, R. Bligh. (2007). Evaluation of concrete material model 159, FHWA-HRT-05-063, 209. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/05063/05063.pdf>

10. Hallquist, J. O. (2006). LS-DYNA Theory Manual, Livermore software technology corporation: Livermore California / Copyright, USA March, p. 680 Available at: https://www.egr.msu.edu/decs/sites/default/files/content/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf

11. Jonsson, P., Jonsén, P., Andreasson, P., Lundström, T., Hellström, J. (2015). Modelling dam break evolution over a wet bed with smoothed particle hydrodynamics: A Parameter Study. *JOURNAL NAME: Engineering*, 7(5), 248–260. doi: 10.4236/eng.2015.75022

12. Bakeer, T. (2009). Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. *Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/200634854_Collapse_Analysis_of_Masonry_Structures_under_Earthquake_Actions

13. Aagaard, B. T., Knepley, M. G., Williams, C. A. (2013). A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 3059–3079. doi: 10.1002/jgrb.50217

Надійшла до редколегії: 07.10.2024

Прийнята до друку: 16.11.2024