

УДК 624

ВПЛИВ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ МАЛОЗАГЛИБЛЕНИХ ПІДЗЕМНИХ БОМБОСХОВИЩ

О.В. Литвин¹,

доцент

В.О. Сахаров²,

професор

¹*Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних Сил, 31, м. Київ. 03037*²*University of Zielona Góra
Licealna Street 9, Zielona Góra., Poland, 65-417*

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.175-185

У статті досліджено вплив вибухових навантажень на міцність малозаглиблених підземних бомбосховищ при детонації бойової частини дрона-камікадзе (90 кг у тротиловому еквіваленті). Запропоновано методика числового моделювання з використанням методу скінченних елементів, рівняння стану JWL для вибухових речовин, моделі Concrete Damaged Plasticity для бетону та Johnson-Cook для сталі. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкцій укриття та ґрунтової основи, оцінено зміну тиску в ґрунті та розміри кратера. Результати підтверджено порівнянням з емпіричними даними. Виявлено, що вхідні групи сприяють проникненню ударної хвилі, що призводить до руйнування конструкцій. Запропоновано модифікацію конструкції укриття шляхом відокремлення вхідних груп та використання демпферної ґрунтової засипки, що значно підвищує міцність.

Ключові слова: інженерні конструкції, числове моделювання, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, взаємодії конструкцій, математичні моделі, ґрунтова основа, вибухові навантаження, міцність.

Вступ. На превеликий жаль, внаслідок збройної агресії російської федерації проти України з використанням різних засобів ураження дальньої дії, виникає нагальна необхідність спорудження укриттів та захисних споруд. Терористичні атаки на цивільне населення найчастіше проводяться безпілотниками-камікадзе типу "Шахед-136", які здатні нести бойову частину масою 50-90 кг [1]. Тому питання аналізу безпеки укриттів при впливі вибухової ударної хвилі під час таких атак є надзвичайно актуальним у сучасних умовах.

Існують різні конструкційні рішення цивільних захисних споруд. Принципи проектування таких конструкцій представлені в різних документах. Ці документи визначають базові вимоги щодо умов розміщення укриття, конструкції сховища, комплектації, об'єму, товщини стін, заглиблення та ін. Це можуть бути норми ДБН [2], як в Україні, технічні рішення, як в Швейцарії [3] чи сполучених Штатах [4] або окремі розпорядження, як у Польщі [5]. Ці документи визначають базові вимоги щодо умов розміщення, конструкцій сховища, комплектації, об'єму, товщини стін, заглиблення, тиску, опромінювання та ін.

Враховуючи вищенаведені фактори в цій статті запропонована методика оцінки впливу вибухової ударної хвилі при детонації бойової частини дрону-камікадзе на міцність конструкцій малозаглиблених прибудинкових укриттів що широко представлені та доступні на ринках Європи та України при взаємодії з ґрунтовою основою.

Запропонований в цій публікації підхід базується на використанні сучасних алгоритмів числового моделювання та математичних моделей поведінки для різних середовищ при високих швидкостях деформування та значних нелінійних процесах що характерні під час дії таких впливів. Також слід зазначити, що дану методику можна удосконалити та верифікувати за результатами натурних експериментів що дозволить в подальшому її використовувати для розробки нових конструктивних рішень таких споруд зменшуючи при цьому кількість натурних випробувань.

1. Постановка задачі. Метою даної роботи є оцінка впливу вибухової ударної хвилі при детонації на поверхні ґрунту 90 кг в тротиловому еквіваленті бойової частини дрон-камікадзе на міцність одного з різновидів конструкцій малозаглибленого прибудинкового укриття, що

широко представлені на ринку для приватного будівництва та оцінити достовірність використаних підходів шляхом порівняння змїну тиску в ґрунтовому середовищі та радіуса і глибини кратеру з інженерними залежностями які представлені на базі результатів польових випробувань із застосуванням потужних вибухових речовин [6, 7].

2. Виклад основного матеріалу

Моделювання вибухової дії під час детонації матеріалу є надзвичайно складним процесом, який значною мірою залежить від самого матеріалу, його форми, середовища та оточуючих конструкцій. Для моделювання найчастіше використовуються три моделі: модель Джона-Вілкінса-Лі (JWL), модель сферичної падаючої хвилі та модель (програма) CONWEP. У даній роботі використане рівняння стану JWL для опису поведінки вибухових речовин при детонації [8], оскільки воно найбільш повно описує поведінку вибухової речовини при детонації, з урахуванням особливості взаємодії з кожним з оточуючих середовищ (ґрунтами, водою, конструкціями тощо), базуючись на фізиці процесу. Модель призначена для моделювання тиску, який створюється продуктами вибуху, залежно від їхньої щільності та енергії

Рівняння JWL описується наступною формулою:

$$P = A \cdot \exp\left(\frac{R_1 V}{\rho_0}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{R_2 V}{\rho_0}\right) + \frac{\omega E}{V}, \quad (1)$$

де P — тиск вибухових продуктів; $V = \rho_0 / \rho$ - відносна питома щільність (де ρ_0 — початкова щільність, а ρ — поточна щільність продуктів вибуху; A , B - емпіричні параметри, що характеризують тиск у двох різних експоненційних режимах розширення; R_1 , R_2 — коефіцієнти, які визначають швидкість експоненційного зменшення тиску; ω - адиабатичний індекс, пов'язаний із співвідношенням між внутрішньою енергією й тиском у кінцевих фазах розширення; E — питомий внутрішній енергетичний стан продуктів вибуху.

Параметри JWL визначають за допомогою експериментальних вимірювань у детонаційних трубах або вибухових камерах де вимірюють тиск, щільність та швидкість розширення продуктів вибуху [9, 10]. Перша частина рівняння (з членами A та B) описує швидке зменшення тиску у початковій фазі розширення вибухових продуктів. Третій член $((\omega E)/V)$ враховує внесок енергії у фазі, коли продукти вибуху починають досягати термодинамічної рівноваги. Модель часто використовується в програмах чисельного моделювання (наприклад, ABAQUS, ANSYS Autodyn, LS-DYNA) для опису поведінки вибухових речовин.

Для моделювання бетону використано модель Concrete damaged plasticity (CDP) [12, 11], яка враховує пошкодження та поступову деградацію матеріалу під час навантаження, утворення тріщин при розтягу, руйнування при стиску, а також вплив швидкості пластичних деформацій, що є важливим для аналізу динамічної поведінки бетону. Еволюція поверхні текучості контролюється еквівалентними пластичними деформаціями. Діаграми, що характеризують поведінку матеріалу при стиску та розтягу, наведені на (рис. 1). Розподіл еквівалентних пластичних деформацій визначається на підставі поверхні текучості. Через неможливість визначення реальної ширини розкриття тріщини, для забезпечення суцільної сітки скінченних елементів (СЕ) використовується метод “розмазування” зони тріщини на групу скінченних елементів шляхом введення в застосовуваній діаграмі стану матеріалу після досягнення граничного напруження або деформацій спадаючої гілки з умовним фізичним значенням пошкодження. Саме частина діаграми моделює розподіл тріщин по певній групі скінченних елементів, дозволяючи таким чином отримати числове рішення. Таке представлення роботи бетону під навантаженням дозволяє відобразити ключові особливості поведінки бетону.

Залежно від рівня досягнутого напружено-деформованого стану розвантаження бетонного зразка відбувається за різними кривими, де зміна січного модуля «пружно-пластичності» описується за допомогою двох параметрів пошкодження d_c (damage compression) та d_t (damage tension), які вважаються функціями пластичних деформацій. Ці параметри пошкодження можуть приймати значення від нуля, що відповідає непошкодженому матеріалу, до одиниці, що відповідає повній втраті міцності.

Якщо E_0 — початкова (неушкоджена) пружна жорсткість матеріалу, то співвідношення напруження-деформації при одновісному навантаженні на розтяг (σ_t) і на стиск (σ_c) відповідно:

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}), \quad (2)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0 \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}), \quad (3)$$

де ε_t , ε_c - загальна деформація розтягу і стиску відповідно, ε_t^{pl} , ε_c^{pl} - еквівалентні пластичні деформації розтягу та стиску відповідно.

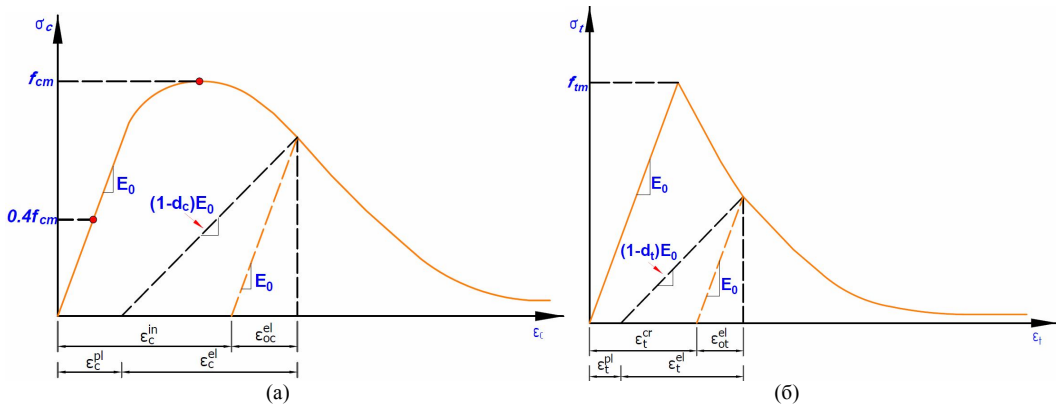


Рис. 1. Діаграми, що характеризують поведінку бетону при стиску та розтягу

Важливою особливістю бетону при циклічному навантаженні є ефект відновлення жорсткості. Жорсткість на стиск відновлюється після закриття тріщини, якщо навантаження змінюється з розтягу на стиск. Проте, при переході від стиску до розтягу жорсткість не відновлюється, оскільки від стиску утворюються роздавлюючі мікротріщини. Таким чином коефіцієнти відновлення жорсткості є окремим параметром, який вводиться при моделюванні поведінки бетону. На рис. 2 зображено цикл одновісного навантаження, що відповідає поведінці за замовчуванням. W_c - коефіцієнти відновлення жорсткості при переході від розтягу до стиску ($W_c=1$). W_t - коефіцієнти відновлення жорсткості при переході від стиску до розтягу ($W_t=0$).

Модель використовує функцію течії Lubliner та ін. [12] з модифікаціями, запропонованими Lee і Fenves [11] для урахування різної еволюції міцності при розтягу та стиску. Модель Concrete Damaged Plasticity (CDP) дозволяє враховувати вплив швидкості пластичних деформацій на межу текучості, що призводить до підвищення міцності матеріалу при високих швидкостях деформування. Це досягається шляхом введення залежності параметрів моделі від швидкості деформацій, що дозволяє моделювати динамічну поведінку бетону під час імпульсних навантажень [13, 14]. Слід зазначити, що параметри цієї моделі потребують ретельного налаштування та калібрування на основі експериментальних даних.

Для моделювання сталі використана Модель Johnson–Cook, що враховує нелінійні пружньо-

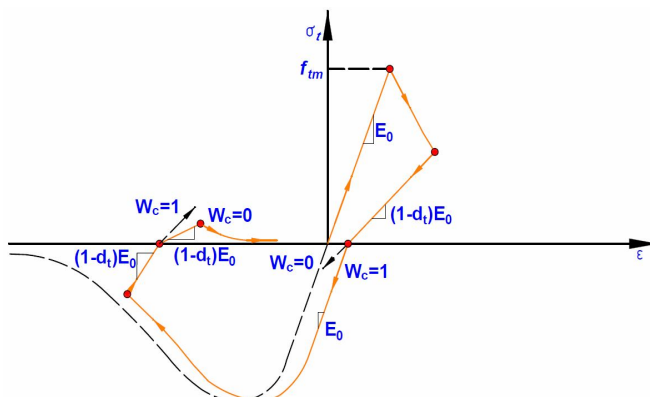


Рис. 2. Зміна жорсткості бетону при циклі одновісного навантаження

пластичні властивості матеріалу, зміцнення при високих швидкостях деформації та зниження міцності зі зростанням температури. Крім того, ця модель включає комплексні критерії руйнування матеріалу, залежні від напруженого стану, швидкості деформації та температури. Параметри моделі визначаються експериментально, що дозволяє проводити тестування та калібрування при наявності відповідних випробувань зразків сталі.

Залежність Johnson–Cook представлена наступним рівнянням [15, 16]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)^m\right], \quad (4)$$

де σ - еквівалентні напруження, ε - еквівалентні деформації, A - границя текучості матеріалу, B і n - константи зміцнення при деформації, C - коефіцієнт зміцнення при швидкості деформації, $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ - безрозмірна швидкість деформації, $\dot{\varepsilon}_0$ - еталонна швидкість деформації, $\dot{\varepsilon}$ - швидкість деформації, T_{room} і T_{melt} - кімнатна температура та температура плавлення матеріалу відповідно.

Модель пошкоджень Johnson–Cook пропонує, що зі збільшенням кількості часових кроків пластична деформація матеріалу накопичується. Коли накопичена пластична деформація досягає граничної деформації руйнування матеріалу, значення пошкодження стає рівним 1, що свідчить про руйнування матеріалу, як показано в рівнянні (5):

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f}, \quad (5)$$

де $\Delta \varepsilon_p$ - приріст еквівалентної пластичної деформації, ε_f - ефективна деформація руйнування на поточному часовому кроці. Ефективна деформація руйнування визначається станом напруження, швидкістю деформації та температурою [92, 123]:

$$\varepsilon_f = \left(D_1 + D_2 e^{D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma}}\right) \cdot (1 + D_4 \ln \varepsilon^*) \cdot \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}}\right)\right], \quad (6)$$

де $D_1, \dots, D_5$ - параметри пошкодження матеріалу, σ_m - середнє напруження та σ - еквівалентне напруження, які розраховується наступним чином:

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]}, \quad (8)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження.

Розрахункова схема укриття складалась з конструкції укриття, ґрунтового масиву та частини повітря над поверхнею ґрунту де розміщено вибухову речовину (рис. 3). Розрахунки проводились у ПК ABAQUS у зв'язаній Ейлерово-Лагранжевій постановці (CEL) прямим динамічним методом за явною схемою з використанням суперкомп'ютерних кластерних систем.

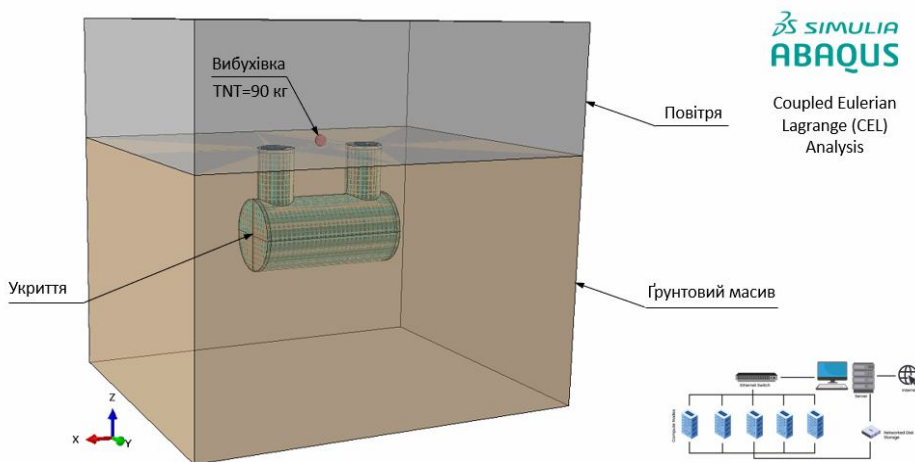


Рис. 3. Розрахункова схема укриття

Грунтове середовище описувалось ідеально пружними елементами з критерієм видалення об'єму ґрунту з Ейлерової комірки при досягненні певного значення гідростатичного тиску розтягу.

Повітря, вибухова речовина та ґрунтове середовище моделювались Ейлеровими елементами, а конструкції укриття та дискретна арматура - Лагранжевими. Моделювання бетону виконано об'ємними СЕ. Арматура моделювалась дискретно стержневими СЕ, які поєднувалась з бетоном за допомогою функції *embedded region* [17]. Крок сітки СЕ для бетону складав не більше 7 см, крок сітки СЕ, що моделюють арматуру, не більше 2,5 см (рис. 4).

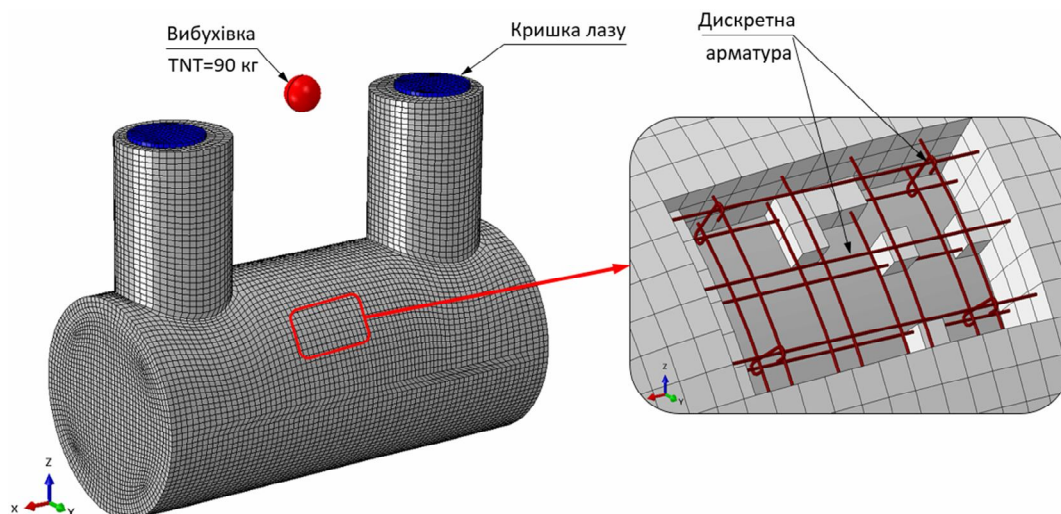


Рис. 4. Скінчено-елементна модель укриття

Конструкція укриття, що досліджувалось, являє собою горизонтальний циліндр зовнішнім діаметром 2,9 м довжиною 6 м, з товщиною стінок 200 мм, який заглиблений в ґрунт на 2 м. Укриття має два вертикальні виходи циліндричної форми внутрішнім діаметром 1,2 м з товщиною стіни 150 мм. Конструкції армовані двома сітками за товщиною з арматури ф8 А400с з чарункою 200х200 мм, поперечна арматура у вигляді шпильок з кроком 400х400 мм.

Для оцінки достовірності використаних підходів було проаналізовано зміну тиску вибухової ударної хвилі в ґрунті по глибині та порівняно з емпіричною залежністю, яка наведена в технічному посібнику для інженерів, які займаються проектуванням захисних споруд, виданому Департаментом армії США (U.S. Department of the Army) [18, 19]:

$$PP = c \left(\frac{R}{M^{1/3}} \right)^{-n}, \quad (9)$$

де R – відстань від точки, що розглядається до джерела вибуху, M – маса вибухової речовини в тротиловому еквіваленті, а c та n – емпіричні константи, що залежать від типу ґрунту. Через невизначеність параметрів ґрунту згідно з [20] для c та n прийняті наступні значення: $c=1,12$ (верхня межа), $c=0,65$ (нижня межа); $n=2,75$ (верхня межа), $n=2,5$ (нижня межа).

Слід зазначити, що при користуванні даним посібником потрібно враховувати відмінності в термінології одиниць виміру. Наприклад, Американська тонна (коротка тонна) використовується переважно у Сполучених Штатах та Канаді і дорівнює 2 000 фунтів (907,185 кілограмів), Європейська тонна (метрична тонна) використовується міжнародною спільнотою, дорівнює 1000 кілограмів (2 204,6226 фунтів), Британська тонна (довга тонна) використовується у Великобританії, дорівнює 2 240 фунтів (1 016,0 кілограмів).

Порівняння зміни тиску з глибиною у ґрунтовому середовищі за емпіричною залежністю (9) та результатів такого розподілу отриманого методом СЕ показано на рис. 5 у логарифмічних координатах.

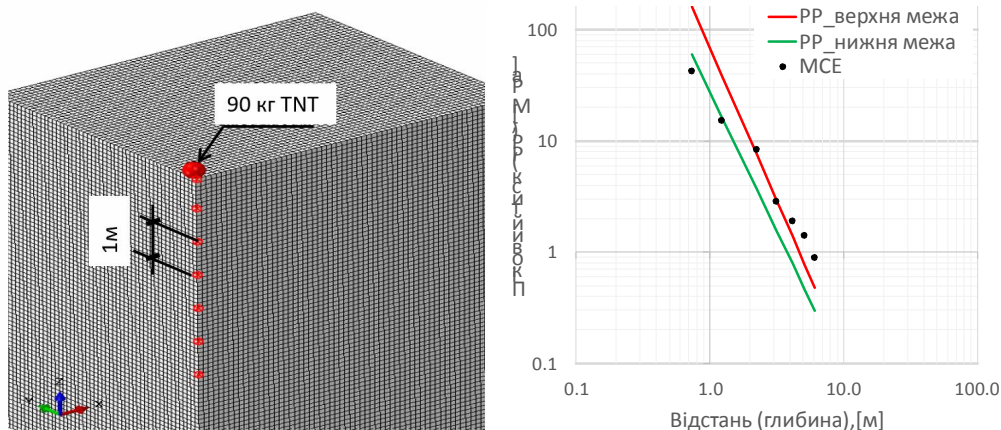


Рис. 5. Порівняння емпіричного пікового тиску з прогнозами методу скінченних елементів (90-кг TNT)

Також для оцінки достовірності порівнювались радіус та глибина кратеру, який утворився в ґрунтовому масиві після вибуху. Отримані розміри порівнювались зі значеннями, які отримані за емпіричними залежностями, представленими в технічному звіті Goulda [21], який надає результати польових випробувань із застосуванням потужних вибухових речовин, а також залежністю запропонованою Соорер [22].

Видимий радіус кратера для вибухового заряду розташованого над поверхнею ґрунту можна приблизно визначити за допомогою емпіричного співвідношення, наведеного Соорер [22]:

$$R_a = (0.46 + 0.027 P_{CJ}) (2 E_{CR} W e^{-1.457 \text{HOB}})^{1/3}, \quad (10)$$

де P_{CJ} – тиск Chapman-Jouguet (CJ) в ГПа, E_{CR} – ефективність утворення кратера, а W – вага заряду вибухової речовини у фунтах, де HOB – відношення висоти заряду над поверхнею до радіуса заряду. Ефективність кратерування для піщано-глинистого ґрунту становить 0,475 (Соорер [22], таблиця 29.1). Тиск Chapman-Jouguet, P_{CJ} , розраховується за методом Соорер [22]:

$$P_{CJ} = \frac{\rho D^2}{4}, \quad (11)$$

де ρ – густина непрореагованої вибухової речовини в г/см³, а D – швидкість детонації в км/с.

Видимі розміри кратера також можна розрахувати, використовуючи емпіричне співвідношення наведене Goulda [21]. Goulda наводить вираз для видимого об'єму кратера, V_a :

$$V_a = V_0 W e^{(-5.2H(V_0 W)^{-1/3})}, \quad (12)$$

де V_0 – ефективність кратерування вибухової речовини у футах³/тонна, коли висота вибуху дорівнює нулю, W – еквівалентна вага заряду в тротиловому еквіваленті в тоннах, а H – висота вибухової речовини над поверхнею у футах. Goulda також наводить емпіричні вирази для видимого радіуса кратера у футах R_a та видимої глибини кратера у футах D_a , як:

$$R_a = 1.2 V_a^{1/3}, \quad (13)$$

$$D_a = 0.5 V_a^{1/3}. \quad (14)$$

Порівняння розмірів отриманої вибухової воронки числовим методом показують добру збіжність з емпіричними даними, що базуються на польових випробуваннях Goulda [21] та залежностях Соорер [22] і предствалені на рис. 6.

Результати моделювання дозволяють детально дослідити розповсюдження вибухової ударної хвилі з урахуванням взаємодії різних середовищ. Отримані результати показали, що наявність жорстких входних груп сприяє розповсюдженню вибухової дії безпосередньо в зону несучих конструкцій укриття.

Після вибуху спостерігалось утворення кратера в ґрунті над укриттям, а також руйнування стін конструкції, насамперед у зонах входних груп та проникнення тиску вибухової ударної хвилі в середину сховища через негерметичні люки-лази.

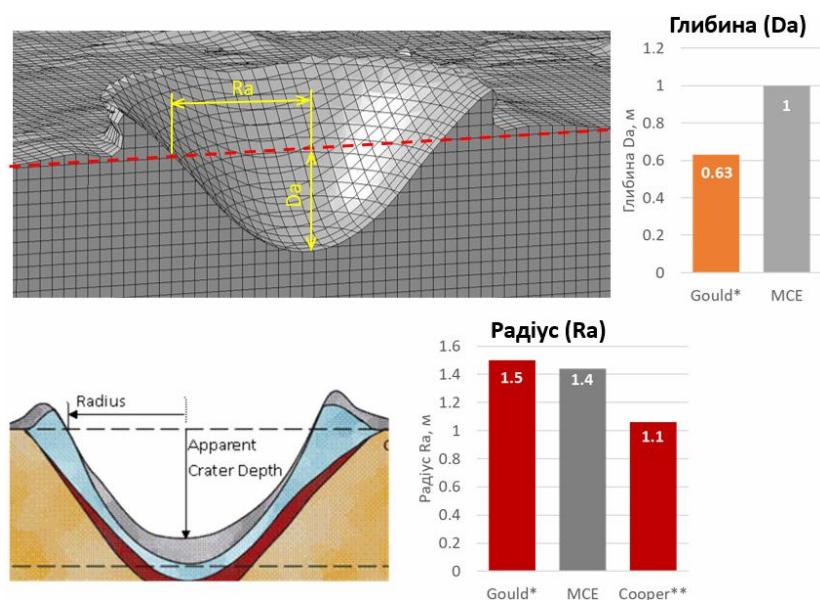


Рис. 6. Порівняння розмірів вибухової воронки, отриманої числовим методом з емпіричними даними, що базуються на польових випробуваннях Goulda [21 та залежностях Cooper [22]

На початковій стадії до 0,02 с можна спостерігати локальні пошкодження верхньої частини лазів. На 0,05 с спостерігались істотне перевищення міцності стін самого укриття. Аналіз характеру деформацій (рис. 7) вказує на те, що отримані пошкодження пов'язані передусім з розміщенням вхідних груп.

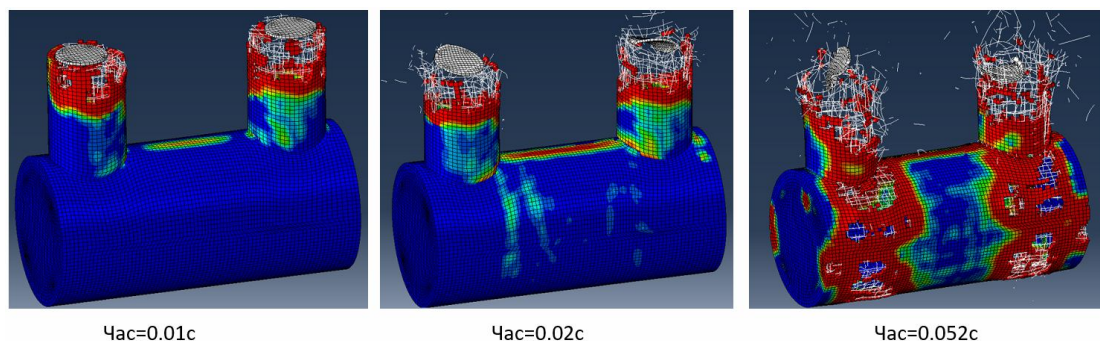


Рис. 7. Пошкодження конструкцій укриття після вибуху (90-кг TNT)

З метою позбавлення цього негативного впливу було розглянуто модифікацію конструкцію, де вхідні групи відрізані від основного укриття. В такому варіанті розрахункова схема складалась лише з конструкції укриття, без вхідних груп, з ґрунтовим масивом та частиною повітря над поверхнею ґрунту де розміщено вибухову речовину.

Відсутність вхідних груп та наявність демпферної ґрунтової засипки дозволило істотно зменшити вплив вибухової ударної хвилі на модифіковану конструкцію укриття при тому ж сценарію вибуху. Конструкція отримала локальні пошкодження, але укриття в цілому зберегло свою міцність (рис. 8).

Оскільки при моделюванні застосовувався критерій видалення SE бетону після досягнення граничних значень деформацій стиску та розтягу, то слід зазначити, що окрім налаштування самих параметрів моделей, що описують поведінку матеріалів, також необхідно налаштувати алгоритми видалення SE для забезпечення стійкості розв'язку та обходу недоліків числової дискретизації і коректного відображення фізичних процесів. Це також є складною задачею,

оскільки передчасне видалення буде призводити до заниженої оцінки міцності, а занадто пізні видалення може призвести до передчасної зупинки розв'язку через надмірну швидкість деформації СЕ.

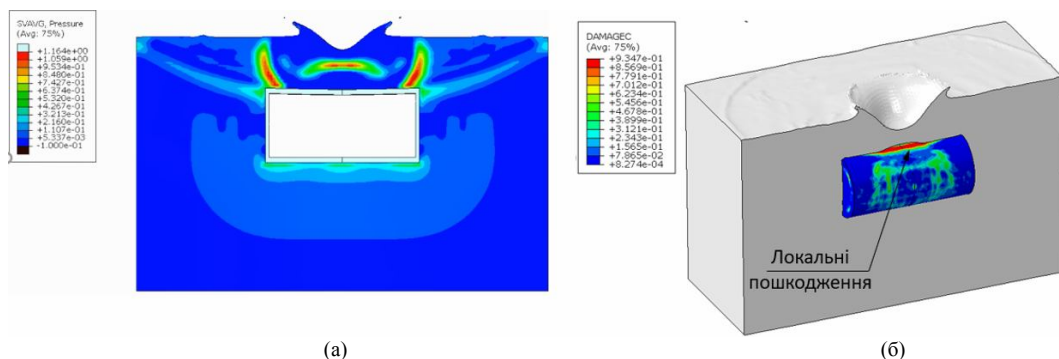


Рис. 8. Вплив вибухової ударної хвилі на модифіковану конструкцію укриття:

(а) розповсюдження тиску в ґрунті та відбиття від конструкцій, (б) вигляд вибухової воронки та пошкоджень

Критерій видалення елементів повинен полягати у тому, що він має бути, перш за все, фізично обґрунтованим, іншими словами, тріснутий елемент слід видалити, якщо його несуча здатність втрачена. Окрім цього фізичного критерію слід додати критерій, який служить обчислювальним цілям, щоб моделювання можна було виконати без числових помилок [23].

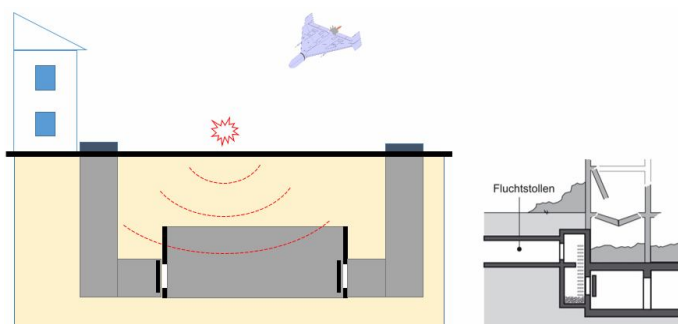


Рис. 9. Конструкція укриття прибудинкового

На основі проведених досліджень для підвищення стійкості укриття до вибухових навантажень рекомендується розміщувати входні групи на максимальній відстані від укриття з захистом через систему з двох-трьох тамбурів-шлюзів із герметичними броньованими дверима (рис. 9). Подібні рішення відповідають нормам, прийнятим у Швейцарії.

Висновки. Підземні укриття забезпечують підвищення рівня безпеки цивільного населення від терористичних атак, зокрема вибухів на поверхні ґрунту. Сучасні комп'ютерні технології і чисельне моделювання дозволяють оцінити реальний вплив вибухової ударної хвилі на несучу здатність таких конструкцій.

Проведені числові тестові дослідження утворення кратера в ґрунті, руйнування бетону під дією вибухових навантажень показали узгодженість з експериментальними даними, інженерними емпіричними залежностями та результатами інших науковців, що підтверджує достовірність отриманих результатів. Слід зазначити, що коректність отриманих даних значною мірою залежить від обраних моделей середовищ, прийнятих граничних умов та параметрів алгоритмів, спрямованих на подолання недоліків дискретизації.

Моделювання вибуху 90 кг в тротиловому еквіваленті показало, що входні групи над укриттям сприяють проникненню ударної хвилі та руйнуванню несучих елементів. Горизонтальні входи та ґрунтова засипка над укриттям забезпечують збереження його міцності. Подібні рішення відповідають нормам, прийнятим у Швейцарії.

На ринку доступні укриття різної конструкції і типу, однак багато з них приділяють більше уваги комфорту, а не технічному обґрунтуванню захисних властивостей. Для оцінки їхньої безпеки необхідні дослідження впливу вибухових навантажень різної інтенсивності, розташування та сценаріїв дії.

Для підвищення стійкості укриття до вибухових навантажень рекомендується розміщувати вхідні групи на максимальній відстані від укриття з захистом через систему з двох-трьох тамбурів-шлюзів із герметичними броньованими дверима.

Окрім налаштування самих параметрів моделей, що описують поведінку матеріалів, також необхідно налаштувати алгоритми видалення СЕ для забезпечення стійкості розв'язку та обходу недоліків числової дискретизації і коректного відображення фізичних процесів. Передчасне видалення СЕ буде призводити до заниженої оцінки міцності, а занадто пізнє видалення може призвести до передчасної зупинки розв'язку через надмірну швидкість деформування СЕ.

В подальшому планується проведення натурних випробувань залізобетонних конструкцій з метою налаштування алгоритму видалення СЕ та калібрування параметрів моделі CDP.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коваль М.В., Коваль В.В., Білик А.С., Коцюрuba В.І., Кубраков О.М. Основи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника / монографія // Видавництво Ліра-К. - К.: 2023. Генеральний штаб Збройних Сил України. — 185 с. ISBN 978-617-520-660-7.
2. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. — Київ: Мінінфраструктури України, 2023. — 78 с.
3. TWK 2017. Technische Weisungen für die Konstruktion und Bemessung von Schutzbauten. (Технічні вказівки щодо конструкції та розрахунку захисних споруд) — Bern: Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2017. — 180 s.
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA 453). Safe Rooms and Shelters: Protecting People Against Terrorist Attacks. — Washington, D.C. (Безпечні приміщення та укриття: Захист людей від терористичних атак. — Вашингтон, округ Колумбія): FEMA, May 2006. — 263 p.
5. Wytyczne Szefa Obrony Cywilnej Kraju z dnia 04.12.2018 p. Zasady postępowania z zasobami budownictwa ochronnego. (Вказівки Голови Цивільної Оборони Країни від 04.12.2018р. щодо правил застосування ресурсів захисного будівництва) — Warszawa: Szef Obrony Cywilnej Kraju, 2018.
6. Gould, K.E. "High-Explosive Field Tests: Explosion Phenomena and Environmental Impacts." DNA 6187F. Washington, DC: Defense Nuclear Agency, October 1981.
7. Cooper, P.W. Explosives Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
8. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products / E.L. Lee, H.C. Hornig, J.W. Kury // Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore. — Report UCRL-50422. — 1968. — 45 p.
9. Pan Z., Jiang N., Zhou J., Zhang P. Dynamic behavior of detonation waves in millimeter-scale tubes: Unraveling the influence of tube diameter, initial pressure, and mixture [Електронний ресурс] / Z. Pan, N. Jiang, J. Zhou, P. Zhang // Experiments in Fluids. — 2024. — Vol. 65. — Article 13. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03744-2>.
10. Sow S., Radulescu M.I. Minimum tube diameters for steady propagation of gaseous detonations [Електронний ресурс] / S. Sow, M.I. Radulescu // Shock Waves. — 2014. — Vol. 24. — P. 447–457. — Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/s00193-014-0505-8>.
11. Lee J., Fenves G.L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // Journal of Engineering Mechanics. — 1998. — Vol. 124. — P. 892–900.
12. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Onate E. A plastic-damage model for concrete // International Journal of Solids and Structures. — 1989. — Vol. 25, No. 3. — C. 299–329.
13. Chen L., Fang Q., Jiang X. Q., Zhang Y. X. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete // International Journal of Impact Engineering. — 2015. — Vol. 86. — C. 40–56.
14. Fang Q., Huan Y., Chen L., Zhang Y. X. Explicit analysis elements of strain rate type RC beam-column and its implementation in ABAQUS software // Engineering Mechanics. — 2013. — Vol. 30, No. 5. — C. 49–55.
15. Johnson, G.R., Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. — 1983. — P. 541–547.
16. Sirigiri, V.K.R., Gudiga, V.Y., Gattu, U.S., Suneesh, G., Buddaraju, K.M. A review on Johnson Cook material model // Materials Today: Proceedings. — 2022. — Vol. 62. — P. 3450–3456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.016>.
17. Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.12. — Providence, Rhode Island : Dassault Systèmes Simulia Corp., 2012.
18. DOD. "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons." TM 5–855–1. Arlington, Virginia: Department of Defense. 1986.
19. Chowdhury A. H. Characterizing Explosive Effects on Underground Structures [Електронний ресурс] / A. H. Chowdhury, T. E. Wilt. — Washington, DC : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2015. — 97 p. — (NUREG/CR-7201). — Режим доступу: <https://www.nrc.gov/docs/ML1524/ML15245A640.pdf>.
20. Nagy, N., M. Mohamed, and J.C. Boot. "Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures." Geomechanics and Engineering. Vol. 2. pp. 1–18. 2010.
21. Gould, K.E. "High-Explosive Field Tests: Explosion Phenomena and Environmental Impacts." DNA 6187F. Washington, DC: Defense Nuclear Agency, October 1981.
22. Cooper, P.W. Explosives Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
23. Rehman S. U. Finite Element Analysis of Impact-perforated Reinforced Concrete Slabs [Електронний ресурс] / S. U. Rehman. — Espoo : Aalto University, 2017. — 72 p. — Режим доступу: https://aaltoodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29336/master_Rehman_Safi_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=2.

REFERENCES

1. Koval M.V., Koval V.V., Bilyk A.S., Kotsiuruba V.I., Kubrakov O.M. Osnovy inzhenerenoho zakhystu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitrianoho napadu protyivnyka (monohrafiia) (Fundamentals of engineering protection of critical infrastructure facilities of the energy sector of Ukraine against enemy air attack (monograph)) // Vydavnytstvo Lira-K. - K.: 2023. Heneralnyi shtab Zbroinykh Syl Ukrainy. – 185 s. ISBN 978-617-520-660-7.
2. DBN V.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu (Civil defense structures). — Kyiv: Mininfrastruktury Ukrainy, 2023. — 78 s.
3. TWK 2017. Technische Weisungen für die Konstruktion und Bemessung von Schutzbauten. - Bern: Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2017. — 180 s.
4. Federal Emergency Management Agency (FEMA 453). Safe Rooms and Shelters: Protecting People Against Terrorist Attacks. — Washington, D.C. FEMA, May 2006. - 263 p.
5. Wytyczne Szefa Obrony Cywilnej Kraju z dnia 04.12.2018 p. Zasady postępowania z zasobami budownictwa ochronnego. - Warszawa: Szef Obrony Cywilnej Kraju, 2018.
6. Gould, K.E. "High-Explosive Field Tests: Explosion Phenomena and Environmental Impacts." DNA 6187F. Washington, DC: Defense Nuclear Agency. October 1981.
7. Cooper, P.W. Explosives Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
8. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products / E.L. Lee, H.C. Hornig, J.W. Kury // Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore. — Report UCRL-50422. — 1968. — 45 p.
9. Pan Z., Jiang N., Zhou J., Zhang P. Dynamic behavior of detonation waves in millimeter-scale tubes: Unraveling the influence of tube diameter, initial pressure, and mixture / Z. Pan, N. Jiang, J. Zhou, P. Zhang // Experiments in Fluids. — 2024. — Vol. 65. — Article 13. <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03744-2>.
10. Sow S., Radulescu M.I. Minimum tube diameters for steady propagation of gaseous detonations / S. Sow, M.I. Radulescu // Shock Waves. — 2014. — Vol. 24. — P. 447–457. <https://doi.org/10.1007/s00193-014-0505-8>.
11. Lee J., Fenves G.L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // Journal of Engineering Mechanics. – 1998. – Vol. 124. – P. 892–900.
12. Lubliner J., Oliver J., Oller S., Oñate E. A plastic-damage model for concrete // International Journal of Solids and Structures. — 1989. — Vol. 25, No. 3. — C. 299–329.
13. Chen L., Fang Q., Jiang X. Q., Zhang Y. X. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete // International Journal of Impact Engineering. — 2015. — Vol. 86. — C. 40–56.
14. Fang Q., Huan Y., Chen L., Zhang Y. X. Explicit analysis elements of strain rate type RC beam-column and its implementation in ABAQUS software // Engineering Mechanics. — 2013. — Vol. 30, No. 5. — C. 49–55.
15. Johnson, G.R., Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. – 1983. – P. 541–547.
16. Sirigiri, V.K.R., Gudiga, V.Y., Gattu, U.S., Suneesh, G., Buddaraju, K.M. A review on Johnson Cook material model // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62. – P. 3450–3456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.016>.
17. Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.12. — Providence, Rhode Island : Dassault Systèmes Simulia Corp., 2012.
18. DOD. "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons." TM 5-855-1. Arlington, Virginia: Department of Defense. 1986.
19. Chowdhury A. H. Characterizing Explosive Effects on Underground Structures / A. H. Chowdhury, T. E. Wilt. — Washington, DC : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2015. — 97 p. — (NUREG/CR-7201). <https://www.nrc.gov/docs/ML1524/ML15245A640.pdf>.
20. Nagy, N., M. Mohamed, and J.C. Boot. "Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures." Geomechanics and Engineering. Vol. 2. pp. 1–18. 2010.
21. Gould, K.E. "High-Explosive Field Tests: Explosion Phenomena and Environmental Impacts." DNA 6187F. Washington, DC: Defense Nuclear Agency. October 1981.
22. Cooper, P.W. Explosives Engineering. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1996.
23. Rehman S. U. Finite Element Analysis of Impact-perforated Reinforced Concrete Slabs / S. U. Rehman. — Espoo : Aalto University, 2017. - 72 p. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29336/master_Rehman_Safi_2017.pdf?isAllowed=y&sequence=2.

Стаття надійшла 23.10.2025

Литвин О.В. Сахаров В.О.

ВПЛИВ ВИБУХОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МІЦНІСТЬ МАЛОЗАГЛИБЛЕНИХ ПІДЗЕМНИХ БОМБОСХОВИЩ

У статті досліджено вплив вибухових навантажень на міцність малозаглиблених підземних бомбосховищ при детонації бойової частини дрона-камікадзе масою 90 кг у тротиловому еквіваленті. Запропоновано методику числового моделювання з використанням методу скінчених елементів у програмному комплексі ABAQUS за Ейлерово-Лагранжевою постановкою. Для опису поведінки вибухових речовин використано рівняння стану JWЛ, для бетону – модель Concrete Damaged Plasticity, яка враховує пошкодження та деградацію матеріалу, а для сталі – модель Johnson-Cook, що моделює нелінійні пружно-пластичні властивості та руйнування. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкцій укриття та ґрунтової основи, оцінено зміну тиску в ґрунті та розміри кратера, що утворюється після вибуху. Результати числового моделювання підтверджено шляхом порівняння з емпіричними залежностями, отриманими з польових випробувань, зокрема за методиками Gould та Cooper. Встановлено, що вхідні групи укриття сприяють проникненню ударної хвилі, що призводить до локальних пошкоджень та руйнування несучих конструкцій, особливо в зонах входів. Запропоновано модифіковану конструкцію укриття, де вхідні групи відокремлені від основної конструкції, а демпферна

грунтова засипка зменшує вплив вибухової хвилі. Це дозволяє зберегти міцність укриття навіть при значних вибухових навантаженнях. Для підвищення стійкості рекомендується розміщувати вхідні групи на максимальній відстані від укриття з використанням системи з двох-трьох тамбурів-шлюзів із герметичними броньованими дверима, що відповідає нормам, прийнятим у Швейцарії. Подальші дослідження передбачають натурні випробування для калібрування параметрів моделей та вдосконалення алгоритмів видалення скінченних елементів, що забезпечить точніше моделювання фізичних процесів.

Ключові слова: інженерні конструкції, числове моделювання, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, взаємодія конструкцій, математичні моделі, ґрунтова основа, вибухові навантаження, міцність.

Lytvyn O.V., Sakharov V.O.

THE INFLUENCE OF EXPLOSIVE LOADS ON THE STRENGTH OF SHALLOW UNDERGROUND BOMB SHELTERS

This study investigates the impact of explosive loads on the strength of shallow underground bomb shelters under the detonation of a kamikaze drone warhead with a 90 kg TNT equivalent. A numerical modeling methodology is proposed, employing the finite element method in the ABAQUS software with a coupled Eulerian-Lagrangian approach. The JWL equation of state is used to describe the behavior of explosives, the Concrete Damaged Plasticity model accounts for damage and degradation in concrete, and the Johnson-Cook model simulates the nonlinear elastic-plastic properties and failure of steel. The stress-strain state of the shelter's structures and soil base is analyzed, alongside pressure changes in the soil and the dimensions of the resulting crater. The numerical results are validated by comparison with empirical relationships derived from field tests, including those by Gould and Cooper. It is found that the shelter's entrance groups facilitate blast wave penetration, leading to localized damage and failure of load-bearing structures, particularly near entrances. A modified shelter design is proposed, with entrance groups separated from the main structure and a damping soil backfill, significantly reducing the blast wave's impact and preserving structural integrity. To enhance resilience, it is recommended to position entrance groups at a maximum distance from the shelter, incorporating a system of two to three airlock chambers with hermetic armored doors, aligning with Swiss standards. Future research will involve full-scale tests to calibrate model parameters and refine finite element removal algorithms for more accurate simulation of physical processes.

Keywords: engineering structures, numerical modeling, finite element method, stress-strain state, structural interactions, mathematical models, soil base, explosive loads, strength.

УДК 624

Литвин О.В., Сахаров В.О. Вплив вибухових навантажень на міцність малозаглиблених підземних бомбосховищ // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2025. – Вип. 115. – С. 175-185.

У статті досліджено вплив вибухових навантажень на міцність малозаглиблених підземних бомбосховищ при детонації бойової частини дрона-камікадзе (90 кг у тротиловому еквіваленті). Запропоновано методику числового моделювання з використанням методу скінченних елементів, рівняння стану JWL для вибухових речовин, моделі Concrete Damaged Plasticity для бетону та Johnson-Cook для сталі. Проведено аналіз напружено-деформованого стану конструкції укриття та ґрунтової основи, оцінено зміну тиску в ґрунті та розміри кратера. Результати підтверджено порівнянням з емпіричними даними. Виявлено, що вхідні групи сприяють проникненню ударної хвилі, що призводить до руйнування конструкцій. Запропоновано модифікацію конструкції укриття шляхом відокремлення вхідних груп та використання демпферної ґрунтової засипки, що значно підвищує міцність.

Іл. 8. Бібліогр. 23 назв.

UDC 624

Lytvyn O.V., Sakharov V.O. The Influence of Explosive Loads on the Strength of Shallow Underground Bomb Shelters // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles- K.: KNUBA, 2025. – Issue 115. – P. 175-185.

The article investigates the impact of explosive loads on the strength of shallow underground bomb shelters under the detonation of a kamikaze drone warhead (90 kg TNT equivalent). A methodology for numerical modeling using the finite element method is proposed, incorporating the JWL equation of state for explosives, the Concrete Damaged Plasticity model for concrete, and the Johnson-Cook model for steel. The stress-strain state of the shelter's structures and soil base is analyzed, along with pressure changes in the soil and crater dimensions. Results are validated against empirical data. It is found that entrance groups facilitate the penetration of the blast wave, leading to structural failure. A modified shelter design with separated entrance groups and a damping soil backfill significantly enhances strength. It is recommended to place entrance groups at a distance with double or triple airlock systems to improve resilience.

Fig. 8. Ref. 23.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): ЛИТВИН Олександр Володимирович, доктор філософії (PhD), доцент кафедри геотехніки.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Робочий тел.: +38(044) 241-55-03

E-mail: lytvyn.ov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2818-3457>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): САХАРОВ Володимир Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки.

Адреса робоча: 65-417, Poland, Zielona Góra, Licealna Street 9, University of Zielona Góra.

Робочий тел.: +48(683) 282-47-7

E-mail: v.sakharov@ib.uz.zgora.pl

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9381-3283>