

© Н.В. Зуєвська<sup>1</sup>, Л.В. Шайдецька<sup>1</sup>, Р.Ф. Харченко<sup>1</sup>, Ю.В. Зуєвський<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

## РЕКОНСТРУКЦІЯ МІСЬКИХ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ДЛЯ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

©N. Zuievska, L. Shaidetska, R. Kharchenko, Y. Zuievskiyi<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine

### RECONSTRUCTION OF URBAN UNDERGROUND STRUCTURES FOR DUAL PURPOSE

**Мета.** Запропонувати технічні рішення для реконструкції підземних переходів у споруди подвійного призначення (СПП) для тимчасового укриття населення під час надзвичайних ситуацій. Врахування сучасних вимог до безпеки, ергономіки та оперативного реагування на можливі надзвичайні ситуації, що підвищує практичну значимість запропонованих рішень. Аналізовано ефективність різних типів конструкцій, інженерних систем та технологій для максимального підвищення їх стійкості та надійності.

**Методи.** Методика досліджень включає: моделювання та аналіз різних сценаріїв дії на конструкції підземних переходів, комп'ютерне моделювання, виконане за допомогою програмного забезпечення 3ds MAX, методи порівняльного аналізу для оцінки ефективності різних інженерних рішень, що стосуються впровадження нових матеріалів та інженерних рішень.

**Результати.** За результатами дослідження були визначені оптимальні технології зміцнення конструкцій, зокрема, використання герметичних дверей, збільшення товщини стін, і впровадження сучасних систем вентиляції. Проведено розрахунки максимальних деформацій конструкцій при різних сценаріях впливу, що підтвердило ефективність запропонованих рішень для підвищення безпеки та надійності СПП.

**Наукова новизна.** У статті вперше створена концепція реконструкції підземного переходу для подвійного використання, здійснено комплексне дослідження з використанням чисельного моделювання впливу вибуху різної маси TNT на підземно конструкцію. Проведено комплексний аналіз можливостей реконструкції підземних переходів у СПП з використанням сучасних технологій та матеріалів. Визначено нові підходи до підвищення стійкості конструкцій у надзвичайних умовах, а також впроваджено методи оцінки ефективності різних інженерних рішень.

**Практична значимість.** Результати можуть бути застосовані при проектуванні та реконструкції підземних переходів. Запропоновані технічні рішення дозволять ефективно адаптувати існуючі підземні переходи до вимог безпеки та перетворити їх на споруди подвійного призначення, що забезпечують захист та комфорт для населення під час надзвичайних ситуацій. Рекомендації, надані у статті, можуть бути основою для розробки нових стандартів у галузі безпеки критичної інфраструктури.

**Ключові слова:** реконструкція, критична інфраструктура, споруди подвійного призначення, безпека, інженерні рішення, моделювання, візуалізація.

**Вступ.** У місті Київ є значний дефіцит укриттів та сховищ, здатних забезпечити безпеку всіх мешканців міста під час надзвичайних ситуацій.

За даними досліджень та звітів від групи громадського спостереження OZON, яка у 2022 році запустила Національну компанію моніторингу укриттів і висвітлила основні проблеми пов'язані із цим, а саме багато укриттів закриті на замки, підхід до деяких перекритий огорожею, а також відсутні вказівні знаки, які ведуть до укриття, та інформаційні таблички на вході. Згідно з проведеними перевітками, вдалося знайти 73 % укриттів, оскільки були видимі ознаки того, що це укриття, або ж місцеві жителі надавали таку інформацію. Інші 27 % укриттів за вказаними адресами знайти не вдалося. Лише 48 % з перевірених укриттів мали позначки "УКРИТТЯ" з напрямком руху, і також тільки 48 % з них були відкриті або на місці був комендант(-ка) з ключем від укриття. Також у багатьох укриттях відсутня каналізація та можливість використання туалету, лише 38 % перевірених укриттів Києва мали справне електропостачання.

Для захисту людей від деяких факторів небезпеки, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій у мирний час, та дії засобів ураження в особливий період можуть використовуватися споруди подвійного призначення (наземна або підземна споруда, що може бути використана за основним функціональним призначенням і для захисту населення). На сьогодні в місті Києві нараховують близько 270 підземних переходів, які можуть слугувати як тимчасові укриття, але не всі вони є придатними для цього. Тому їх модернізація є актуальною інженерно-технічною задачею.

**Мета досліджень** полягає в збільшенні кількості укриттів для населення шляхом реконструкції підземних переходів у споруди подвійного призначення (СПП) для тимчасового укриття (до 48 годин). Для вирішення цієї задачі пропонується підсилення існуючої конструкції та облаштування внутрішньої конструкції з ізолюючими коридорами. Відповідно до [ДБН В.2.2-5-97] СПП повинні забезпечувати належні умови для перебування людей та захисту їх від небезпечних чинників, що можуть виникнути під час надзвичайних ситуацій, воєнних дій та терористичних актів.

**Основна частина.** Україна наразі потребує збільшення укриттів. Аналіз сталих підходів інших країн у переоблаштуванні, зміні чи доповненні функцій наявних бомбосховищ та споруд подвійного призначення, як у період післявоєнного відновлення Україна та зокрема м. Києва може змінити підхід до політик щодо будівництва, облаштування, ремонту й обслуговування наявних і нових укриттів та бомбосховищ, керуючись принципами сталого будівництва, універсального дизайну та кругової економіки.

Так наприклад в Ізраїлі активно використовуються укриття типу "мамад" (мерхав муган дирати), які стали обов'язковими для нових будівель після 1992 року. Це захищені кімнати, що мають залізобетонні стіни, броньовані двері та системи очищення повітря. Вони можуть виконувати функції спальні, кабінету або комори, але в разі надзвичайної ситуації стають безпечними укриттями. Впровадження "мамадів" було ініційовано урядовими агентствами Ізраїлю, зокрема Міністерством оборони та Home Front Command. І на даний момент

звичайні люди мають думати за безпеку свого життя і переобладнуючи одну із кімнат, чи добудовуючи її у застосуванні як «мамад» [1].

У США використовують мобільні укриття типу Safe Rooms, особливо в регіонах, схильних до торнадо. Вони виготовляються з металу або армованого бетону і встановлюються у підвалах, гаражах або на першому поверсі будівель. Safe Rooms здатні витримувати високі навантаження та удари, забезпечуючи безпеку мешканців під час вторгнення в будинок, торнадо, терористичної атаки чи іншого загроза (рис. 1). У безпечних кімнатах зазвичай є комунікаційне обладнання, щоб можна було зв'язатися з правоохоронними органами. Ці укриття були розроблені і впроваджені агентствами з надзвичайних ситуацій, такими як FEMA (Federal Emergency Management Agency) [2].

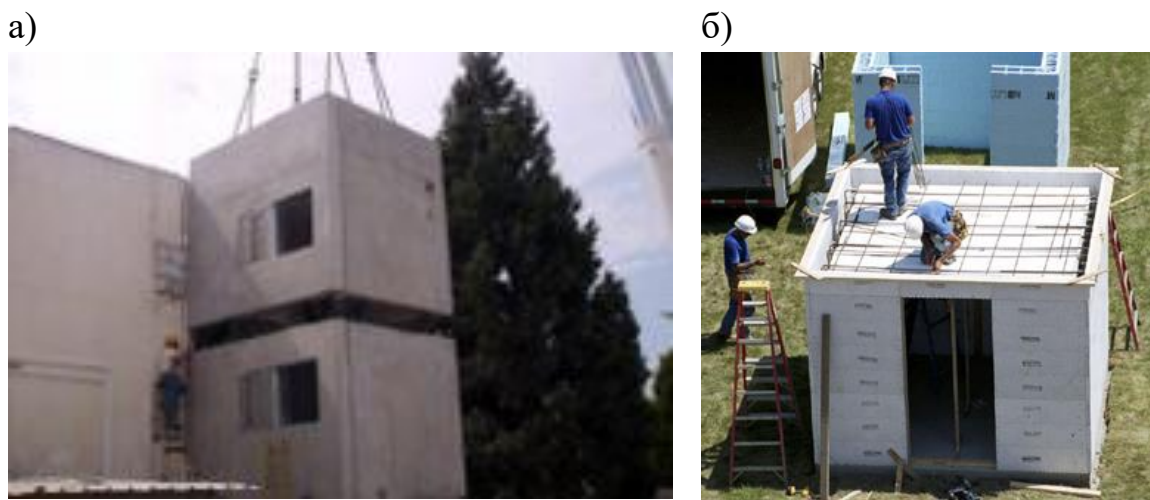


Рис.1. Конструкції укриттів: а – укриття типу «мамад» [1], б – укриття типу Safe Rooms [2]

Окремо хочеться виділити Швейцарію, яка у 1960-х роках почала будувати найбільшу в світі систему укриттів цивільного захисту. І хоча країна не була осередком науки та техніки за часів холодної війни, однак у галузі дослідження та будівництва ядерних бункерів вона встановила золотий стандарт. З початку 1960-х років альпійська республіка інвестувала 12 мільярдів доларів у будівництво ядерних укриттів, більшість з яких розташовані у підвалах односімейних будинків. До 2006 року влада оголосила, що в Швейцарії достатньо місця для притулку для 114 % населення. Жодна інша країна світу ніколи не створювала такої комплексної системи підземних камер виживання. Швейцарський уряд виявив виняткову далекоглядність і рішучість, інвестуючи в інфраструктуру, що забезпечує безпеку своїх громадян у випадку ядерної загрози. Ці дії стали не лише засобом захисту, але й символом національної безпеки [3].

У деяких містах України, таких як Черкаси, Харків та Полтава, були встановлені тимчасові укриття на зупинках громадського транспорту. Ці укриття виготовлені з металу та оснащені основними засобами для захисту від небезпечних факторів (рис. 2). Вони забезпечують тимчасовий захист для населення під час

обстрілів або інших надзвичайних ситуацій. Ці заходи були впроваджені місцевими органами влади та агентствами з надзвичайних ситуацій [4].

а)



б)



Рис. 2. Конструкції укриттів: а – зовнішній вигляд, б – внутрішній вигляд

Враховуючи досвід, та напрацювання які використовуються для будівництва укриттів пропоную збільшити їх кількість шляхом реконструкції підземних переходів у споруди подвійного призначення (СПП) для тимчасового укриття населення (до 48 годин).

Конструкції пішохідних тунелів можуть мати прямокутний, склепінчастий і круговий поперечний переріз. Їх ширину зазвичай призначають виходячи з перспективи інтенсивності пішохідних потоків і пропускної здатності 1 м тунелю. За вимогами [5] розміри пішохідних тунелів повинні бути у світлі ширина – не менше 3 м, а висота не менше – 2,3 м. Дозволяється зменшувати ширину при невеликих потоках до 2,5 м. Зазвичай пішохідні тунелі влаштовуються шириною 4, 6 та 8 м.

В конструкціях підземних переходів є декілька недоліків, а саме обмежений захист від вибухів і обвалів, відсутність вентиляції, відсутність основних зручностей (санітарних кімнат). А одним з основних є вибір мінімальної глибини закладання з урахуванням розташування підземних комунікацій.

Для усунення вище наведених недоліків можна запропонувати наступне:

- удосконалення конструкцій, а саме збільшення товщини стін до 1–1,5 м, влаштування герметичних шлюзів у входах-виходах, у підземному переході; влаштування внутрішньої захисної конструкції у середині підземного переходу;

- проектування системи вентиляції у підземних укриттях повинно враховувати вимоги ДБН В.2.2-5, щоб забезпечити ефективний повітрообмін та підтримання належного рівня якості повітря", також встановлення системи вентиляцій ШСС у підземних укриттях повинно відповідати вимогам ДСТУ 9077, щоб гарантувати надійний повітрообмін та безпечне середовище" (ДБН В.2.2-5; ДСТУ 9077);

- забезпечення доступності та евакуації, відповідно до ДБН В.2.2-5:2023 "Захисні споруди цивільного захисту", підземні переходи, які використовуються як СПП, повинні мати відповідні конструктивні рішення для забезпечення

захисту від вибухів, радіаційного впливу та інших небезпечних факторів. Ці споруди повинні бути обладнані герметичними дверима, системами фільтрації повітря та забезпечувати необхідний рівень механічного опору. Важливо також передбачити наявність автономних джерел електропостачання та систем водопостачання для створення належних умов для перебування людей.

Як приклад розглянемо підземний перехід «Олекси Тихого» – станція Правобережної лінії Київського швидкісного трамвая, розташована між станціями "Індустріальна" і "Політехнічна". У безпосередній близькості знаходяться численні факультети та гуртожитки Київського політехнічного інституту. Оскільки укриття є не у всіх гуртожитках, реконструкція підземного переходу у сховище подвійного призначення є розумним рішенням для забезпечення безпеки студентів та викладачів.

Площа підземного переходу задовольняє всі необхідні вимоги для створення ефективного укриття. Від корпусів 14, 15, 16, 18, 22, 23 КПІ ім. Ігоря Сікорського підземний перехід знаходиться у 2–3 хвилини ходьби навіть не в швидкому темпі, що забезпечить швидкий доступ до укриття та збереження життя багатьох людей у разі надзвичайної ситуації. Схема розташування підземного тунелю наведена на рис. 3. Таке рішення дозволить створити безпечне місце для перебування великої кількості людей, що особливо важливо в умовах воєнних дій та терористичних загроз.

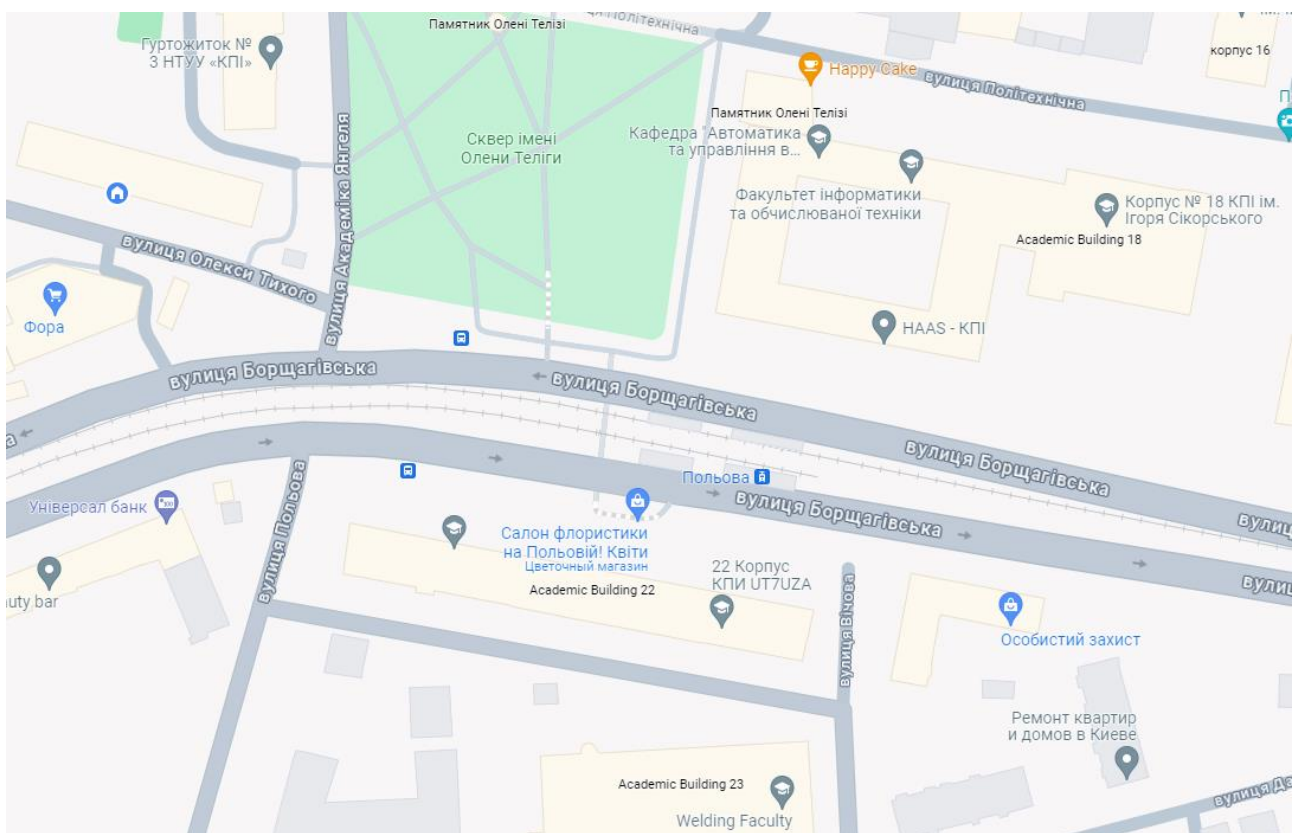


Рис. 3. Ситуаційний план



Рис. 4. Лего блоки збірної конструкції

Для реконструкції підземного переходу рекомендується використовувати технологію запропоновану Законом залізобетонних виробів № 1 м. Кременчук [6], яка є швидкопоруджувана (3–7 днів для монтажу споруди та 3–7 днів для доведення її до готовності), модульна (зрозумілі, ефективні, прості для монтажу блоки/елементи) захисної споруди, що відповідає сучасним вимогам для такого типу споруд та реаліям війни в Україні (див. рис. 4). Така конструкція використовується для наземних, напівзаглиблених, підземних укриттів, розрахованих на будь-яку кількість людей (10, 50, 100, 200, 400 тощо). Для виготовлення конструкції застосовуються залізобетонні блоки товщиною 60–80 см, з важкого бетону (М300) та армовані балки перекриття з важкого бетону (М300).

На рис. 5 наведений поперечний переріз пішохідного тунелю до та після реконструкції. Пунктирною лінією на схемі наведений переріз до реконструкції, а суцільною – після. Крім того по обидва боки від захисної конструкції розташовуються ізолюючі коридори, які можуть використовуватися для облаштування вентиляції тощо.

Як видно з рис. 5 первинна ширина складає 5,9 м. після проведення посилюючої реконструкції ширина проходу складатиме 3,3 м, що допустимо згідно ДСТУ (Ширина ПП). План реконструкції робилася з урахуванням бокових технічних проходів, які одночасно слугують і ізоляційними коридорами. В них будуть розташовані системи кондиціонування та вентиляції.

На рис. 6 наведений план пішохідного тунелю, на якому видно запропоновані конструктивні та технологічні рішення, а саме 1, 2, 3, 4 – гермозатвори, 5 – ліжко-місця. Пропонується вбудувати захисні гермозатвори на входи до переходу\станції. Також облаштувати по периметру викидні ліжко-місця для сидіння.

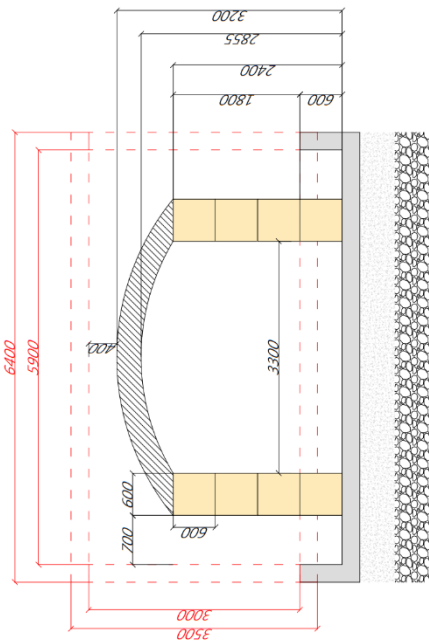


Рис. 5. Поперечний переріз підземного тунелю

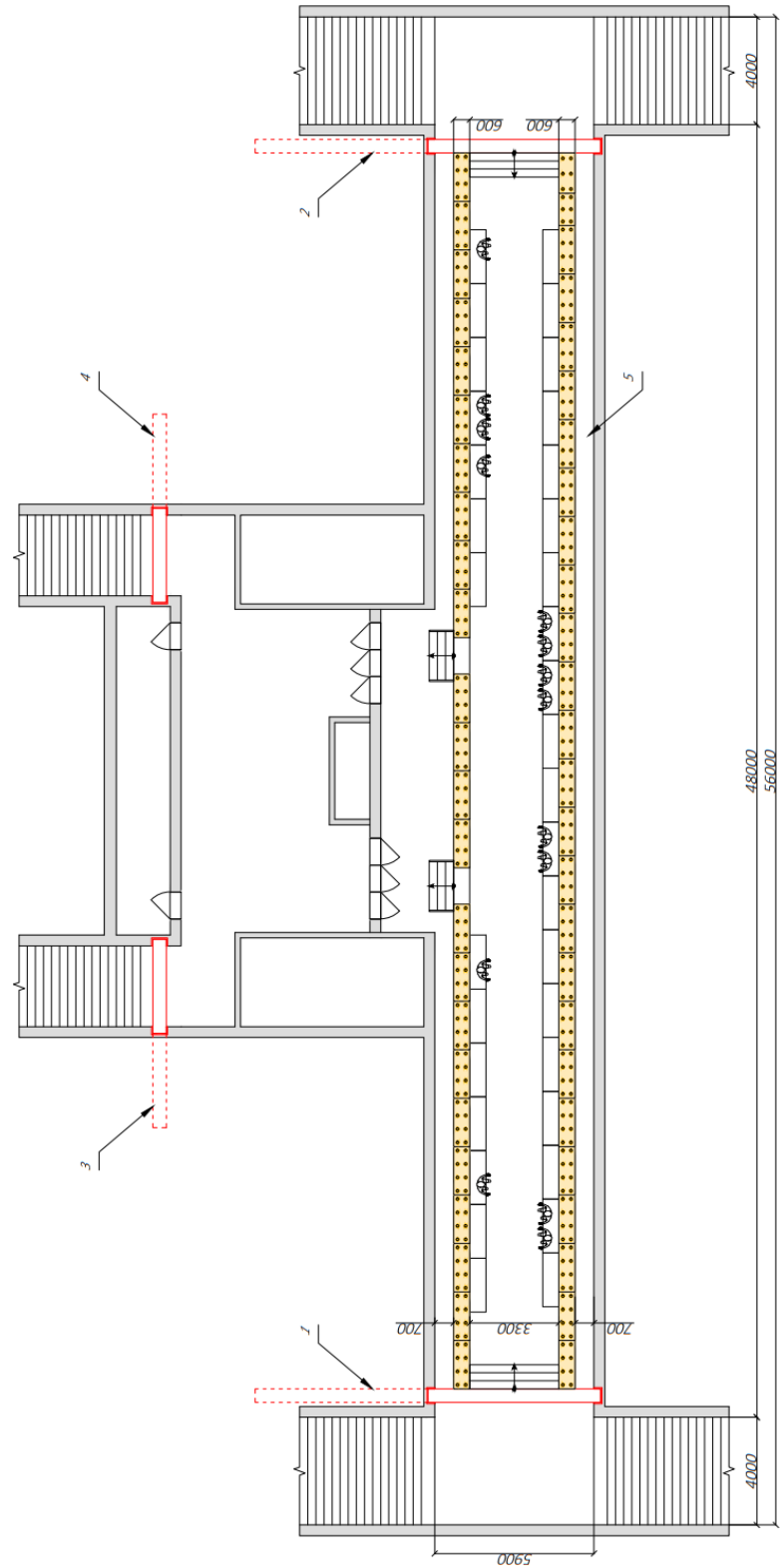


Рис. 6. План підземного переходу



Рис. 7. 3D візуалізація виконана у програмі 3ds MAX

Ця 3D-візуалізація, створена у програмі 3ds MAX (див. рис. 7), демонструє інтер'єр підземного переходу, який був переобладнаний у споруду подвійного призначення (СПП) для тимчасового укриття під час надзвичайних ситуацій.

Підземний тунель має стандартний прямокутний поперечний переріз із склепінчастою стелею, що підсилює стійкість конструкції. Стеля і стіни виконані з важкого бетону (м300), товщина кожного блоку стіни 60 см, товщина армованих балок перекриття 80 см що додає міцності та захисту від вибухів.

Вздовж стін розташовані складані металеві лави, підвішені на міцних ланцюгах. Ці лави можуть використовуватися як для сидіння, так і для лежання у випадку потреби, що збільшує кількість місць для розміщення людей.

Ліворуч видно трубопроводи, ймовірно, частина вентиляційної системи або інженерних комунікацій, що забезпечують циркуляцію повітря або водопостачання. Це важливий елемент для забезпечення комфортного і безпечного перебування людей у споруді.

На стелі розміщені вбудовані світильники, що забезпечують рівномірне освітлення тунелю, роблячи його зручним і безпечним для перебування людей.

Визначення місткості

Загальна площа укриття становить 283,2 м<sup>2</sup>. Після укріплення переходу площа для перебування буде становить 158,4 м<sup>2</sup>. Допустима норма підлоги на одну особу для комфортного перебування – 1,08 м<sup>2</sup>. Нормована площа підлоги на одну особу: 0,5 м<sup>2</sup>.

158,4 x 1,08 = 146 людей.

Розрахунок показників

1. Загальна площа укриття:

– Загальна площа укриття = 283,2 м<sup>2</sup>.

2. Площа приміщення для комфортного перебування осіб:



- Фактична площа підлоги на одну особу = 1,08 м<sup>2</sup>.
- Кількість осіб, що можуть перебувати в укритті при площі 1,08 м<sup>2</sup> на одну особу:

$$\frac{\text{Загальна площа укриття}}{\text{Фактична площа підлоги на одну особу}} = \frac{158,4 \text{ м}^2}{1,08 \text{ м}^2} = 146 \text{ людей}$$

- 3. Кількість осіб, що можуть перебувати в укритті при максимальній загрозі.
- Нормована площа підлоги на одну особу: 0,5 м<sup>2</sup>.

$$158,4 \text{ м}^2 / 0,5 \text{ м}^2 = 316 \text{ людей}$$

Згідно з проведеними розрахунками, загальна площа укриття після укріплення становить 158,4 м<sup>2</sup>. Це дозволяє забезпечити безпечне перебування в укритті для різної кількості людей залежно від умов.

#### 1. Комфортне перебування:

При комфортній нормі площі підлоги на одну особу, яка складає 1,08 м<sup>2</sup>, укриття може вмістити до 146 осіб. Це забезпечує достатній простір для комфортного перебування протягом певного часу.

#### 2. Максимальна кількість осіб при підвищеній загрозі:

При максимальному завантаженні укриття, коли норма площі підлоги на одну особу складає 0,5 м<sup>2</sup>, укриття може вмістити до 316 осіб. Це розраховано для ситуацій, коли є необхідність.

Для прогнозування стійкості посиленого підземного переходу з метою використання його як тимчасового укриття використовувалось програмне забезпечення ANSYS Explicit Dynamics. Розглядався вибух 50 кг (рис. 8) та 100 кг TNT (рис. 9).

Вихідні дані:

#### SOIL\_LOESS\_LOAM

Laine L., Sandvik A., "Derivation of mechanical properties for sand", 4th SILOS, CI-Premier LTD, p361-367

Density	2,641e-06 kg/mm <sup>3</sup>
---------	------------------------------

#### TNT

IWL Equations of State Coeffs. for High Explosives Lee Finger & Collins. UCID-16189. January 1763

Density	1,63e-06 kg/mm <sup>3</sup>
---------	-----------------------------

#### Other

Explosive JWL	
Parameter A	3,7377e+05 MPa
Parameter B	3747,1 MPa
Parameter R1	4,1500
Parameter R2	0,90000
Parameter W	0,35000
C-J Detonation Velocity	6,93e+06 mm/s
C-J Energy / unit mass	3,681e+06 J/kg
C-J Pressure	21000 MPa

## Concrete

Density	2,3e-06 kg/mm <sup>3</sup>
---------	----------------------------

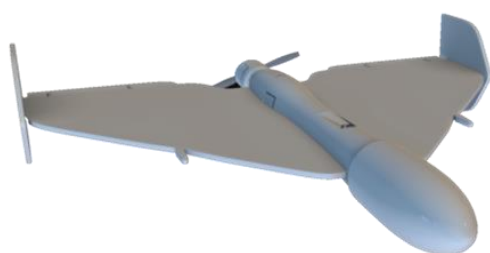
### Structural

▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	30000 MPa
Poisson's Ratio	0,18000
Bulk Modulus	15625 MPa
Shear Modulus	12712 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,4e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	41,000 MPa
Compressive Yield Strength	0 MPa
Tensile Ultimate Strength	5,0000 MPa
Tensile Yield Strength	0 MPa

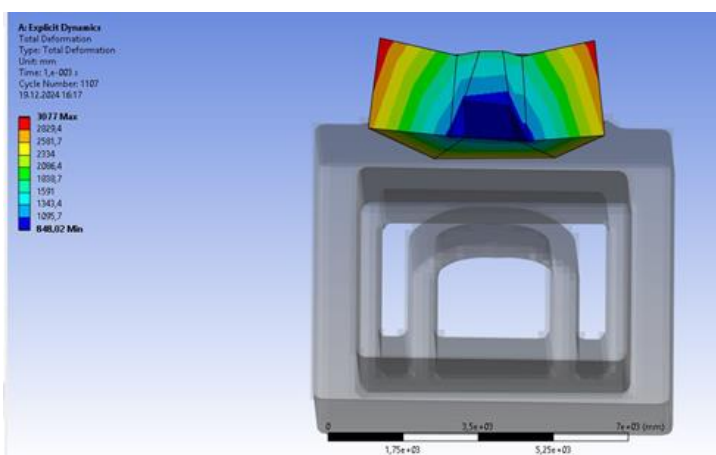
### Thermal

Isotropic Thermal Conductivity	0,00072000 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	7,8e+05 mJ/kg·°C

Були отримані результати для загальних переміщень ґрунту і конструкції в ґрунті. При центральному вибуху в 50 кг, що відповідає приблизно масі вибухівки на БПЛА типу Shahed 136 переміщення є тільки в поверхневому шарі ґрунту, який складає 2 метри (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. БПЛА типу Shahed 136 (а) та загальні переміщення ґрунту та підземної конструкції (б)

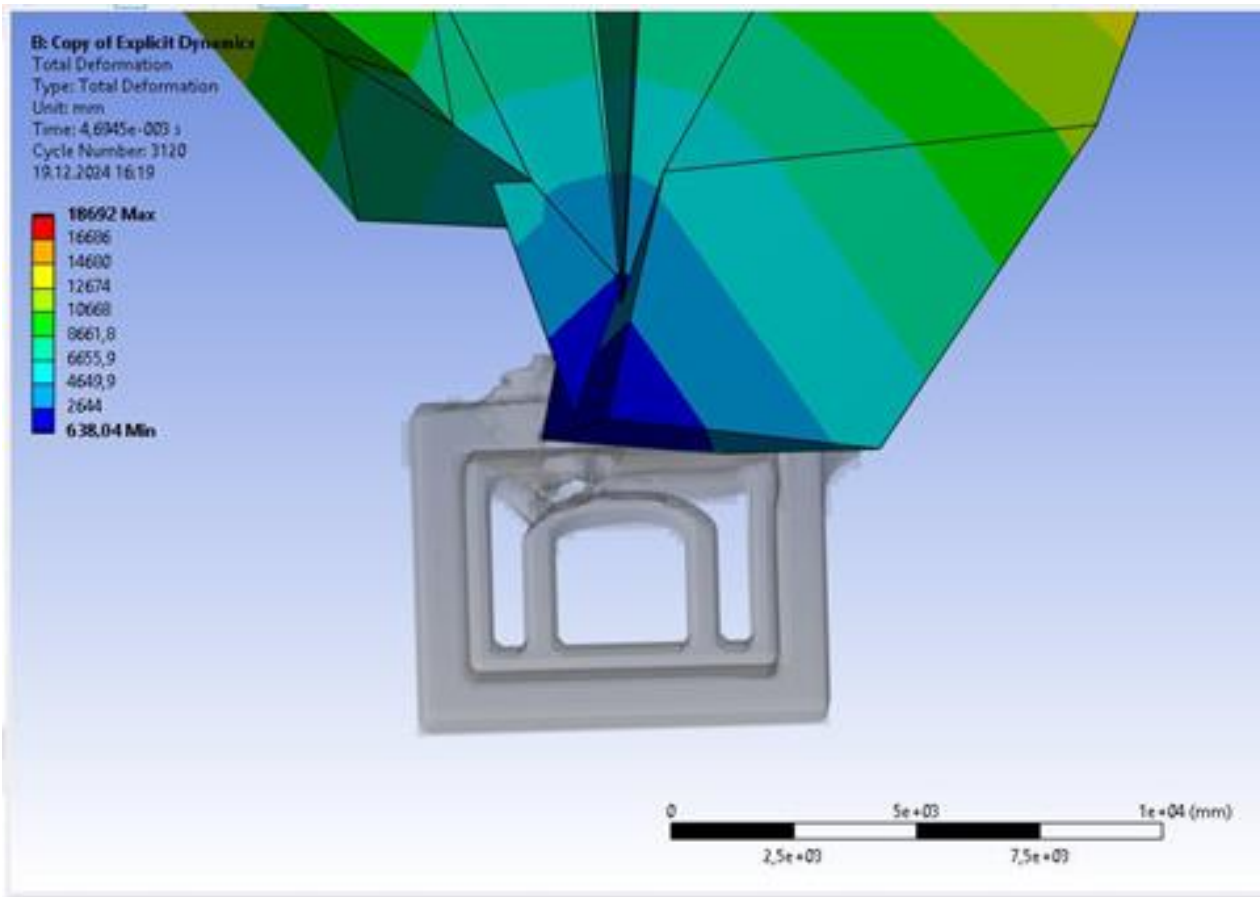


Рис. 9. Загальні переміщення ґрунту та підземної бетонної конструкції при масі вибуху 100 кг

Запропоноване посилення з метою використання підземного переходу як тимчасового укриття має перспективу. Авторами статті представлено посилення, яке не порушує норми для основного використання підземного переходу, але ще й дозволяє використовувати його як тимчасове укриття.

**Висновки.** Можливість використовувати укриття для більш ніж однієї мети часто робить багатоцільове укриття привабливим для власника приміщення, адже це дозволяє власникам повернути інвестиції та підтримувати сховище у належному стані; простір укриття використовується за експлуатаційним призначенням, коли укриття не служить прихистком під час небезпеки.

Для оболонки та каркасу укриття бетон наразі є безальтернативним варіантом. І хоча він вважається нестійким матеріалом з низькими циркулярними якостями, проте при будівництві укриття використовується найбільш якісний матеріал, аби забезпечити найбільшу міцність, і це означає що навіть через багато років ці конструкції можна буде перебудовувати і повторно використовувати, адже вони не втратять свою конструктивну якість.

Авторами обґрунтована доцільність реконструкції підземних переходів з використанням бетонних лего конструкцій в якості тимчасових сховищ, а також представлений розрахунок, що дозволяє оцінити міцність сховища при нормальній експлуатації та при екстремальній ситуації.

### Перелік посилань

1. Бомбосховища Ізраїлю: чи реально так зробити в Україні. (n.d.). Defense Express [https://defence-ua.com/minds\\_and\\_ideas/bomboshovischa\\_izrajilju\\_chi\\_realno\\_tak\\_zrobiti\\_v\\_ukrajini-11761.html](https://defence-ua.com/minds_and_ideas/bomboshovischa_izrajilju_chi_realno_tak_zrobiti_v_ukrajini-11761.html).
2. Eeing, V. T., & Kruse, J. B. (2006). Valuing self-protection: income and certification effects for safe rooms. *Construction Management and Economics*, 24(10), 1057–1068. <https://doi.org/10.1080/01446190600851090>
3. Ziauddin, S. B. (2017). Superpower Underground: Switzerland's Rise to Global Bunker Expertise in the Atomic Age. *Technology and Culture*, 58(4), 921–954. <https://www.jstor.org/stable/26803362>
4. Гребінник, Д., Цьомик, Г., & Гаєвська А. (2022). У Харкові встановили першу зупинку-укриття. *Суспільне Харків* <https://suspilne.media/kharkiv/272808-u-harkovi-vstanovili-persu-zupinku-gromadskogo-transportu-aka-moze-sluguvati-ukrittam/>
5. ДБН В.2.3-5:2018 "Вулиці та дороги населених пунктів" (2018). Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2018/08/DBN-V23-5-2018.pdf>
6. DEFENSIVE FORTIFICATIONS from the manufacturer – Fortecya-zone (n.d.). <https://fortecya-zone.com.ua/en/>

### ABSTRACT

**Purpose.** To propose technical solutions for the reconstruction of underground passages into dual-use structures (DPU) for temporary shelter of the population during emergencies. Considering modern requirements for safety, ergonomics and prompt response to possible emergencies, which increases the practical significance of the proposed solutions. The efficiency of various types of structures, engineering systems and technologies is analyzed to maximize their stability and reliability.

**Methods.** The research methodology includes modeling and analysis of various scenarios of action on the structures of underground passages, computer modeling performed with the help of 3ds MAX software, methods of comparative analysis to assess the effectiveness of various engineering solutions related to the introduction of new materials and engineering solutions.

**Results.** Based on the results of the study, optimal technologies for strengthening structures were identified the use of hermetic doors, increasing the thickness of walls, and the introduction of modern ventilation systems. Calculations of the maximum deformations of structures under different impact scenarios were carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed solutions to improve the safety and reliability of the DPU.

**Originality.** The article first created a concept for the reconstruction of an underground passage for dual use, carried out a comprehensive study using numerical modeling of the impact of an explosion of different masses of TNT on an underground structure. A comprehensive analysis of the possibilities of reconstructing underground passages in the SPP using modern technologies and materials was carried out. New approaches to increasing the stability of structures in emergency conditions were identified, and methods for assessing the effectiveness of various engineering solutions were also introduced.

**Practical value.** The results can be applied in the design and reconstruction of underpasses. The proposed technical solutions will make it possible to effectively adapt the existing underpasses to safety requirements and turn them into dual-purpose structures that provide protection and comfort for the population during emergencies. The recommendations provided in the article can be the basis for the development of new standards in the field of critical infrastructure security.

**Keywords:** reconstruction, critical infrastructure, dual-use structures, security, engineering solutions, modeling, visualization.