

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.035.4:355.58-047.44

Г. І. ГАЙКО^{1*}, А. Л. ГАН², В. В. ВАПНІЧНА³, І. О. МАТВІЙЧУК⁴

^{1*} Кафедра геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056, телефон +38 (050) 921 94 59, ел. пошта gauko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0002-4263-5958

² Кафедра геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056, телефон +38 (097) 653 05 66, ел. пошта gan@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-0832-1338

³ Кафедра геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056, телефон +38 (063) 037 28 48, ел. пошта vapnichna.viktoria@iit.kpi.ua, ORCID 0000-0003-3938-4358

⁴ Кафедра геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056, телефон +38 (093) 930 50 56, ел. пошта matveychuk593@gmail.com, ORCID 0000-0002-3262-8762

АНАЛІЗ ПРОГРЕСИВНИХ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

Мета. Аналіз прогресивних типів і конструкцій підземних споруд цивільного захисту від ударів з повітря, розроблення та впровадження інноваційних рішень у практику будівництва та реконструкції захисних об'єктів, особливо для випадків прямого потрапляння боезарядів у периметр підземної споруди. **Методика.** В умовах широкомасштабної агресії росії проти України проблема захисту населення від можливих ударів з повітря отримує пріоритетне значення, а використання підземного простору формує основний напрямок інженерних рішень. В рамках дослідного проєкту МОН України «Моделювання ризиків та захист від критичних впливів споруд міської підземної інфраструктури та цивільного захисту» (№ 0124U000912). Порівняльний аналіз та диференціація захисних споруд, вдосконалені методи реновації та застосування існуючих підземних об'єктів за новим (захисним) призначенням; методи пошуку нових технічних рішень захисту споруд мілкого закладання від ударів з повітря. **Результати.** Перспективним напрямком для розвитку використання метрополітену як сховища цивільної оборони є реновація та облаштування не задіяних у транспортних та допоміжних операціях тунелів, які можуть значно збільшити місткість таких сховищ та покращити умови перебування людей. Способи реновації та облаштування тунелів метрополітену, економічно ефективні конструктивні рішення та способи зведення споруд цивільного захисту. **Наукова новизна.** Проведена диференціація підземних захисних об'єктів за принципом захисту від ударів з повітря у випадках прямого та непрямого (віддаленого від периметру підземної споруди) потрапляння боезаряду. Вперше оправи із ґрунтобетону, що утворені струменевою цементациєю ґрунтів, розглядаються як тримальні конструкції, здатні сприймати, зокрема, і динамічні (вибухові) навантаження. **Практична значимість.** Ефективне впровадження в практику підземного будівництва прогресивних технічних рішень і способів реновації та адаптації до функцій сховища існуючих підземних споруд, зведення захисних споруд інноваційними методами, зокрема із використанням ґрунтобетону. Широке будівельне освоєння технологій струменевої цементациї ґрунтів дає підстави вважати, що опанування нового способу зведення підземних споруд із ґрунтобетону не викличе ускладнень і не займе багато часу.

Ключові слова: споруди цивільного захисту; підземні об'єкти; тунелі метро; реновація; модульні сховища; оправа із ґрунтобетону; струменева цементация

Вступ

Відсутність доктрини масштабної війни сучасною конвенційною зброєю в Європі тривалий час виключала пріоритетність безпекового (захисного) фактору в планувальних і проєктних рішеннях розвитку міст. В Україні нагальні

потреби захисту цивільного населення та критичної інфраструктури в умовах воєнного стану потребують широкого освоєння міського підземного простору з метою створення нових захисних об'єктів (зокрема, споруд цивільного захисту), а також використання існуючих підземних споруд, які за необхідності можуть слугувати для захисту населення від ударів з

повітря, забезпечуючи функції об'єктів подвійного призначення (Панкратова, Гайко, & Савченко, 2020; Pankratova, Haiko, & Savchenko, 2024).

Загрози цивільному населенню від різноманітних вибухових зарядів конвенційної зброї, ризику регулярних ударів з повітря по українським містам потребують інтенсивного нарощування кількості та якості захисних споруд, у першу чергу підземних. Тільки ракет різного типу станом на 20 серпня 2024 р. було випущено по території України 9627 одиниць (Перелік ракетних ударів під час російського вторгнення, 2024).

Підземні споруди цивільного захисту можна диференціювати за функцією захисту від ударів з повітря на 2 групи: прямого та непрямого (віддаленого від периметру підземної споруди) потрапляння боезаряду. Більшість типів укриттів надійно захищають населення від дії ударної та термічної хвиль і розльоту уламків при різноманітних ударах з повітря в разі непрямого, віддаленого від сховища на певну відстань потрапляння вибухових зарядів (ДБН В.2.2-5:2023, 2023).

У випадках прямого влучання боеприпасів із вибухом над перекриттям чи у безпосередній близькості до стін захисних споруд забезпечити захист може лише глибоке закладання підземних споруд (наприклад, глибокі станції чи тунелі метрополітену), або спеціальний інженерний захист підземних об'єктів мілкового закладання (наприклад, із застосуванням огорожувальних конструкцій із ґрунтобетону). Слід зазначити, що ризик випадкового прямого потрапляння ракети в периметр підземного сховища цивільної оборони залишається відносно невеликим, тому навіть звичайні укриття мілкового закладання здатні захистити людей від більшості загроз.

Мета

Метою статті є аналіз прогресивних типів і конструкцій підземних споруд цивільного захисту від ударів з повітря, розроблення та впровадження інноваційних конструктивних рішень у практику будівництва та реконструкції захисних об'єктів, особливо для випадків прямого потрапляння боезарядів у периметр підземної споруди.

Методика

Порівняльний аналіз та диференціація захисних споруд, вдосконалені методи реновації та застосування існуючих підземних об'єктів за новим (захисним) призначенням; методи пошуку нових технічних рішень захисту підземних споруд мілкового закладання від ударів з повітря.

Результати

1. Використання підземних споруд метрополітену

Широке застосування підземних споруд метрополітену як об'єктів подвійного призначення свідчить про значні можливості цього напрямку захисту населення, оскільки ці об'єкти вже функціонують і можуть ефективно використовуватись як захисні споруди (наприклад, станції метрополітену), або потребують лише реновації та облаштування для виконання захисних функцій (окремі недіючі тунелі). Так станції Київського метрополітену під час ракетних обстрілів столиці приймають як сховища до 50-60 тис. осіб (рис. 1), а на станціях Харківського метрополітену були навіть утворені шкільні класи з одночасним очним навчанням близько тисячі школярів. Проте, як свідчать розрахунки (Тютюкін, 2020), потужний вибух над станцією метрополітену мілкового закладання (наприклад – падіння літака) призводить до руйнування конструкцій станції і загроз людям, які перебувають у підземному просторі.



Рис. 1. Станція Київського метрополітену під час ракетних обстрілів міста Києва, 2022 р.

Перспективним напрямком для розвитку використання метрополітену як сховища цивільної оборони є реновація та облаштування не задіяних у транспортних та допоміжних опера-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ціях тунелів, які можуть значно збільшити місткість таких сховищ та покращити умови перебування людей. Тунелі метро широко використовувались як захисні споруди в Лондоні під час Другої світової війни (Askroyd, 2012) і були увічнені в серії картин художника Генрі Спенсера Мура (рис. 2). Похмура атмосфера таких сховищ, натуралістично відображена художником, негативно впливає на психологічний стан людей, особливо в разі тривалого перебування в укритті (Препотенська, 2014). Це потребує в сучасних умовах зміни ситуації та облаштування в тунелях зручних приміщень для тривалого перебування людей.



Рис 2. Генрі Мур «Сховища в Лондонському метрополітені», 1941 р. (використання тунелів як сховищ)

Унаслідок розвитку підземної інфраструктури ліній метрополітену, основних гілок комунікаційних колекторів, транспортних тунелів тощо, виникають випадки, коли зникає необхідність в подальшій експлуатації та використанні окремих тунелів або цілих тунельних розгалужень. Зазвичай такі недіючі тунелі відгороджуються, зачиняються та консервуються на невизначений час (Козлов, 2011). В умовах сьогодення, коли виникла гостра необхідність захисту населення від російської агресії, доцільно інвентаризувати такі підземні споруди та на основі визначеного технічного стану провести необхідні заходи щодо їх реновації з урахуванням вимог та потреб цивільного захисту.

Розглянемо проект реновації таких тунелів в умовах Київського метрополітену. У двох недіючих паралельних тунелях (рис. 3) відстань між якими становить 20 м, діаметр – 4,1 м, довжина – 1000 м, глибина закладання – 70...100 м, прийняте рішення розмістити простійне укриття.

Для забезпечення необхідної пропускної здатності, зручності пересування й розміщення

людей в укритті, його надійності й нормативного терміну служби, оптимізації вентиляційних потоків, герметичності, пожежної безпеки тощо, реновацією передбачено відновлення існуючих похилих ходків між тунелями та додаткове спорудження через кожні 20...50 м додаткових збіжок (ходків). Крім того, передбачається будівництво переходу зі станції метрополітену в тунелі сховища. Інвентаризація та обстеження ходків показали певний ступінь руйнації існуючого залізобетонного кріплення (тріщини, корозія, вивали), тому в ходках передбачають заміну постійного кріплення. Повний демонтаж старого ушкодженого кріплення зумовлений зокрема потребою не зменшувати діаметр ходка. Нове постійне кріплення (оправа) буде включати монолітний залізобетон (з арматурним каркасом) та суцільну ізолюючу обшивку з листової сталі товщиною $\delta=8$ мм. Після спорудження оправи ходка його внутрішні конструкції будуть зачищені, погрунтовані та пофарбовані.

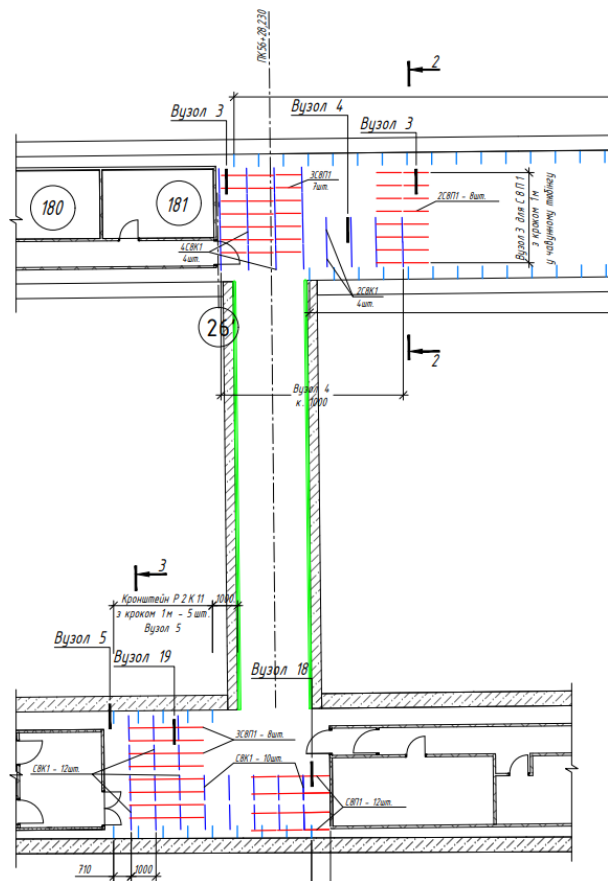


Рис. 3. Схема реконструкції тунелів з урахуванням потреб цивільного захисту

Похилий ходок буде оснащений маршовими сходами, а тунелі – системою приміщень необхідного призначення.

Усі роботи по ходкам і збійкам доцільно починати знизу вгору з нижнього тунелю, який закріплений збірною залізобетонною оправою (діаметр 4,1 м). Подачу (видачу) обладнання, матеріалів доцільно виконувати мотовозами з платформами, по тунелях діючого метрополітену, відповідно до розробленого в окремому випадку регламенту. Розламаний (вирубаний) залізобетон старої оправи існуючого ходка вручну, по жолобу, подається в лоткову частину нижнього тунелю, підбирається ковшем малогабаритного фронтального навантажувача і транспортується до тимчасового відвалу в зоні діючого перегінного тунелю. Після накопичення певного об'єму будівельного сміття, в нічний час після припинення руху потягів і зняття напруги на контактну рейку, виконують її відвантаження на платформи метрополітену для наступного вивозу в депо.

При спорудженні ходків подачу та монтаж металевих елементів кріплення виконують за допомогою лебідки, що розташована у виробці. Приготування бетонної суміші з сухих компонентів (пісок, щебінь, цемент) виконують на місці укладки в малогабаритному розчинному вузлі. Бетонування виконується за допомогою малогабаритного бетононасосу.

Роботи з реконструкції похилих ходків можна виконати в два етапи. На першому етапі:

- в залізобетонній оправі підхідної виробки (тунель $\varnothing 4100$ мм) вирубують штробу і ставлять двотаврову балку № 30 для підхвату склепіння устя сполученого похилого ходка;

- проводять монтаж металокаркасних тимчасового рамного підсилення залізобетонної оправи $\varnothing 4100$ мм в існуючому тунелю для безпечного розкриття устя виробки;

- знизу вгору виконують розламування залізобетону існуючого ходка заходками, що відповідають шагу встановлюваних сталевих рам ходка.

На другому етапі виконують наступні роботи:

- проводять монтаж арматурного каркасу, металоізоляцію (обшивку з листової сталі, яка виконує роль опалубки) та бетонування конструкції;

- після набору проектної міцності бетону цієї частини конструкції ходка демонтують тимчасове підсилення оправи існуючих тунелів біля устя ходків.

В ході проведення реновації, тунелі облаштовуються спеціальними приміщеннями для перебування людей та проходною галереєю (рис. 4). Стеля, стіни, перегородки приміщень цивільного захисту складаються з сандвіч панелей товщиною 100 мм, вхід у галерею (коридор) та приміщення забезпечується протипожежними дверима. Підлога спирається на опори й складається: з алюмінієвого рифленого настилу завтовшки 3 мм; під ним знаходиться шумоізолювальна підкладка під алюміній завтовшки 5 мм; далі металопрофіль ТП-35; плівка пароізоляційна Strotex PI N-110; мінеральна вата вогнестійка – 100 мм; Z-профіль 1,5 мм оцинкований ($32 \times 100 \times 32$) – 100 мм; оцинкований лист – 0,5 мм; швелер № 12 та двотавр № 18.

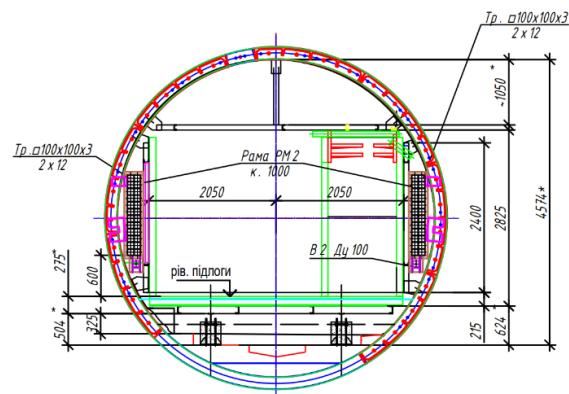


Рис. 4. Схема облаштування тунелю метрополітену з урахуванням потреб цивільного захисту

Система приміщень, розташованих в тунелях метрополітену з урахуванням потреб цивільного захисту, може функціонувати автономно і включати в себе всі необхідні інженерні системи та містить: вентиляційну камеру, електрощитову, кімнати відпочинку, санвузли, насосну, кухню тощо.

Таким чином утворюється сховище цивільного захисту, здатне розмістити на тривалий час у відносно комфортних умовах декілька сотень людей, надійно захищаючи їх (завдяки значній глибині закладання тунелів та використанню ефективних конструкцій оправ) від будь-якої комбінації повітряних ударів конвенційної зброї.

нок нарощування кількості модулів) і рекомендовані для захисту працівників невеликих підприємств або дитячих (навчальних) закладів.

Для розрахунку споруд цивільного захисту, згідно з Нормами (ДБН В.2.2-5, 2023) прийнято, що надмірний тиск вибухової хвилі приводиться до квазістатичного (еквівалентного) рівномірно-розподіленого тиску від 100 до 500 кПа (залежно від класу або групи захисної споруди). У розглянутому сховищі модульного типу з монолітною залізобетонною плитою перекриття завтовшки 200 мм забезпечується нормативне навантаження 100 кПа. Зазначені нормативні рекомендації (ДБН В.2.2-5, 2023) не розглядають випадків прямого влучання боєприпасів із вибухом на поверхні чи у безпосередній близькості до стін або покриття захисних споруд (крім прямого влучання уламків). Тобто передбачається, що розглянуті заглиблені споруди цивільного захисту надійно захищають населення від ударів з повітря в разі непрямого потрапляння вибухових боєзарядів, а для захисту від влучання в периметр споруди потрібен спеціальний інженерний захист об'єктів мілкого закладання.

3. Зведення підземних споруд цивільного захисту із ґрунтобетону

Для забезпечення надійності споруд цивільного захисту мілкого закладання від прямого влучання вибухових боєзарядів (зокрема ракет з масою бойової частини до 500 кг) товщина залізобетонного перекриття приймається від 0,5 до 2 м і більше з одночасним заглибленням об'єкту до 10 м і глибше. Будівництво таких об'єктів передбачає вельми високі матеріальні витрати, пов'язані із значною матеріаломісткістю захисних конструкцій та складністю способів їх зведення.

Розвиток підземного будівництва в ґрунтових масивах потребує вдосконалення зведення підземних споруд і забезпечення надійності та економічності конструкцій опра в умовах недостатньої прогнозованості проявів гірського тиску, гідрологічних та динамічних впливів (зокрема – від ударів з повітря). Основні типи кріплення підземних об'єктів мілкого закладання виконують із монолітного чи збірного залізобетону. Вони відрізняються високою вартістю (матеріаломісткістю) і складністю монтажу, що пов'язано, зокрема, із необхідністю застосування на одному об'єкті різних будіве-

льних технологій: буріння свердловин для облаштування буронабивних чи буросічних паль (стіна в ґрунті), земляні роботи для створення котловану, бетонування або монтаж збірного залізобетону, засипання котловану тощо, причому різноманітні конструктивні елементи й матеріали кріплення необхідно у значних кількостях транспортувати до місця зведення. Крім того, більша частина огорожувальної стіни в ґрунті (поширеного способу зведення підземних споруд відкритим способом) від земної поверхні до перекриття споруди після засипання котловану втрачає будь яку корисну функцію й великі кошти, витрачені на неї, виявляються в подальшому непродуктивними. У деяких випадках (приміром, в зоні критичних вибухових навантажень або впливу водних об'єктів) типові залізобетонні оправи не забезпечують надійність споруди й потребують значного збільшення товщини або замонолічування навколишніх ґрунтів (Кравець, Гайко, Ган, А. Л., Ган, О. В. & Шайдецька, 2024).

Перспективним напрямком формування підземних конструкцій може стати струменева цементация ґрунтів, яка знаходить все більш широке застосування в підземному й геотехнічному будівництві (Díaz, Salamanca-Medina, Tomás, 2024; Cheng, S. H. et al., 2023; Вапнічна, Коробійчук, Зуєвська, Іськов, Ковалевич, 2022; Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, & Тютюкін, 2023). На кафедрі геоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського був розроблений спосіб зведення підземних споруд із ґрунтобетону, якій здатен підвищити надійність споруд цивільного захисту в умовах критичних навантажень при скороченні загальних витрат на будівництво. Технічною задачею нового способу є удосконалення зведення підземних споруд шляхом збільшення технологічності процесу будівництва за рахунок використання виключно струменевої цементации (замонолічування) ґрунтів, скорочення витрат матеріалів і загальної вартості підземної споруди за рахунок поєднання функцій огорожувальних і постійних (тримальних) конструкцій споруди та використання навколишнього ґрунту як складової ґрунтобетонних конструкцій.

Зведення підземних споруд із ґрунтобетону здійснюють наступним чином (рис. 6). На проектну глибину закладання підземної споруди із земної поверхні 1 в ґрунт 2 за допомогою бури-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

льної установки 3 та бурової колони 4 бурять свердловини 5.

Буровою колоною 4 в донну частину свердловини 5 подають струменевий монітор 6 і нагнітають насосом під високим тиском (до 50 МПа) цементний розчин, що при обертанні й повільному підйманні бурової колони 4 разом із монітором 6 призводить до руйнації ґрунту 2 високою кінетичною енергією струменя, перемішування його з цементним розчином і утворення ґрунтобетонної колони 7.

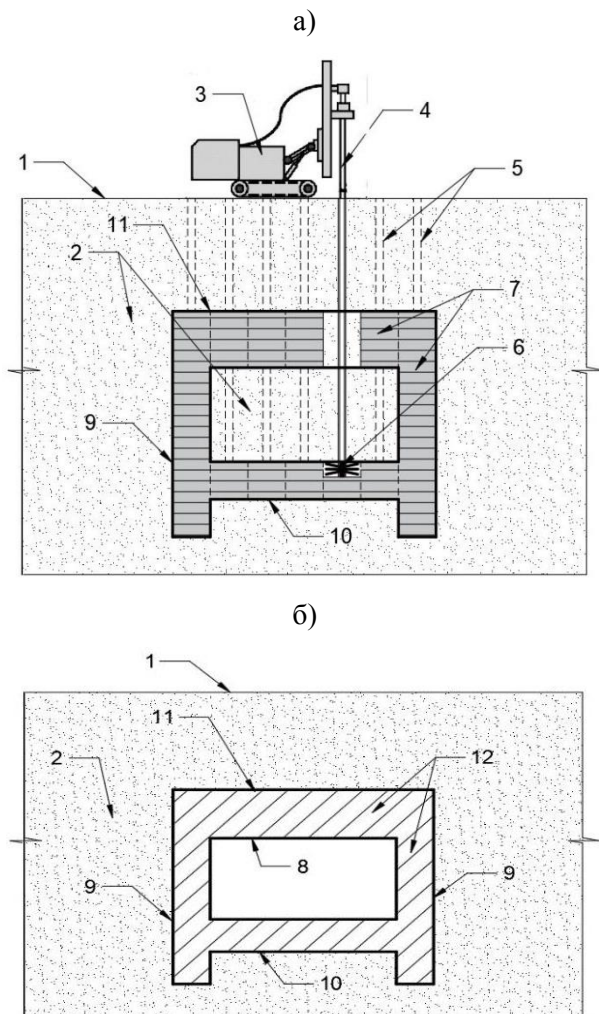


Рис. 6. Схема зведення підземних споруд із ґрунтобетону:

- а) стадія струминного замонолічування ґрунтів на контурі підземної споруди (поперечний розріз);
 б) зведена підземна споруда після вилучення ґрунту всередині (поперечний розріз)

Такі сполучені одна з одною ґрунтобетонні колони споруджують по контуру 8 підземної споруди, починаючи з конструкцій стін 9. Далі

ґрунтобетонні колони споруджують на ділянках подушки (підшви) 10 і перекриття (покрівлі) 11 на кожній свердловині, залишаючи між подушкою та перекриттям шар ґрунту 2, висота якого дорівнює проектній висоті підземної споруди всередині. Напрямок формування ґрунтоцементних колон 7 знизу – вгору, відстань між осями свердловин 5 роблять меншою, ніж діаметр ґрунтобетонних колон 7, що призводить до сполучення (пересікання) сусідніх ґрунтобетонних колон і утворення суцільного замонолічення ґрунту. За необхідності в ґрунтобетонні колони 7 через свердловини 5 вводять за допомогою бурової колони 4 арматурні стрижні, а висоту ґрунтобетонних колон 7 у подушці 10 і перекритті 11 доводять до необхідної товщини постійних конструкцій підземної споруди (згідно проекту). Після утворення першого ряду ґрунтобетонних колон 7 (у поперечному перерізі споруди), подібним же чином послідовно формують сполучені другий і наступні ряди колон, проводячи суцільне замонолічування ґрунтів у повздовжньому напрямку до забезпечення проектної довжини споруди. Після тужавіння ґрунтобетону 12 під захистом стін 9, подушки 10 і перекриття 11 вилучають ґрунт 2 усередині споруди.

Таким чином забезпечується можливість повного оконтурення підземної споруди шаром замонолічених ґрунтів та відпадає потреба в облаштуванні котловану. Висота стінових конструкцій при цьому не перебільшує висоти підземної споруди, що значно скорочує витрати у порівнянні з традиційним способом «стіна в ґрунті». Високотехнологічна струменева цементация забезпечує суцільне замонолічування ґрунтів на задану висоту, формуючи необхідні тримальні (захисні) параметри конструкцій, та використовує навколишні ґрунти як матеріал-наповнювач ґрунтобетонних колон, що скорочує час і вартість будівництва.

Утворена ґрунтобетонна споруда може виконувати функції захисного огороження розміщеного в ній об'єкта цивільного захисту (наприклад, розглянутого в п. 2 сховища модульного типу), а може безпосередньо виконувати функції такого об'єкта, що потребує згаданого вище армування ґрунтобетону, забезпечення необхідної товщини ґрунтобетонних конструкцій та підсилення їх зсередини шарами набризкбетону.

Слід зазначити, що досвід використання струменевої цементациї ґрунтів під час зведення захисних стінових конструкцій із ЖЕТ-паль для огороження котлованів напрацьований низкою будівельних компаній м. Києва. Приклад огороження котловану стіною з ЖЕТ-паль для зведення підземної споруди цивільного захисту в освітньому закладі Дніпровського району м. Києва наведений на рис. 7.



Рис. 7. Використання струменевої цементациї ґрунтів для огороження котловану (2024)

Широкі будівельні освоєння технологій струменевої цементациї ґрунтів дає підстави вважати, що опанування нового способу зведення підземних споруд із ґрунтобетону не викличе ускладнень і не займе багато часу.

Наукова новизна та практична значимість

Проведена диференціація підземних захисних об'єктів за принципом захисту від ударів з повітря у випадках прямого та непрямого (віддаленого від периметру підземної споруди) потрапляння боєзаряду. Для першого випадку оцінені можливості реновації та використання недіючих тунелів Київського метрополітену глибокого закладання.

Для умов мілкого закладання укриттів розроблений спосіб захисту підземних об'єктів огорожувальними конструкціями за монолітних ґрунтів. Вперше оправи із ґрунтобетону, утворені струменевою цементациєю ґрунтів, розглядаються як тримальні конструкції, здатні сприймати, зокрема, і динамічні (вибухові) на-

вантаження. Їх застосування значно збільшить надійність підземних захисних споруд у разі прямого потрапляння боєзарядів при ударах з повітря.

Висновки

Реновацію (реконструкцію) та використання для цивільного захисту вже існуючих підземних споруд, які з різних причин припинили функціонування за призначенням (або можуть суміщати основну та захисну функції) слід розглядати як перспективний напрямок швидкого та економічно доцільного забезпечення цивільного населення укриттями від ударів з повітря. При цьому недіючі тунелі метрополітену зберігають значний потенціал для перетворення в споруди цивільного захисту. Оскільки значна частина таких тунелів (в умовах Київського метрополітену) мають велику глибину закладання (до 100 м і більше), то здатні забезпечити надійність захисту навіть в разі прямого влучання вибухового боєзаряду в периметр захисної споруди на поверхні.

До прогресивних рішень споруд подвійного призначення (зокрема, цивільного захисту) слід віднести металеві модульні конструкції мілкого закладання, перевагами яких є швидке спорудження, заводське виготовлення, транспортабельність окремих модулів, економічність, забезпечення нормативних вимог функціонування укриттів. Розглянуті заглиблені споруди цивільного захисту надійно захищають населення від дії ударної та термічної хвиль і розльоту уламків при різноманітних ударах з повітря в разі непрямого (віддаленого від сховища на певну відстань) потрапляння вибухових боєзарядів.

Для захисту підземних споруд мілкого закладання від прямого влучання боєзарядів доцільно використовувати розроблені в КПІ укриття з ґрунтобетону, утвореного струменевою цементациєю ґрунтів на контурі споруди. У разі відповідного підсилення конструкцій (армування, набризкбетон) такі ґрунтобетонні укриття можуть бути самостійними захисними спорудами. Утворені струменевою цементациєю ґрунтів оправи із ґрунтобетону, розглядаються як тримальні конструкції, здатні сприймати, зокрема, і динамічні (вибухові) навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Ackroyd, P. (2012). *London Under. Paperback – International Edition*. London: Vintage Books, 202.
- Díaz, E., Salamanca-Medina, E. L., & Tomás, R. (2024). Assessment of compressive strength of jet grouting by machine learning. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(1), 102-111.
- Pankratova, N. D., Haiko, H. I., & Savchenko, I. O. (2024). *Modelling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Springer.
- Cheng, S. H., Chao, K. C., Wong, R. K., Morris, I., & Wang, M. (2023). Control of jet grouting process induced ground displacement in clayey soil. *Transportation Geotechnics*, 40, 100983.
- Вапнічна, В. В., Коробійчук, В. В., Зуєвська, Н. В., Іськов, С. С., & Ковалевич, Л. А. (2022). Обґрунтування способу ущільнення ґрунту міжстанційного тунелю струминним нагнітанням на основі комп'ютерного моделювання. *ІОР: Земля та навколишнє середовище*, Т. 1, №1, 012048. IOP Publishing.
- Гетун Г., Безклубенко І., Соломін А., Баліна О. (2023). Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*, (67), 203-220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220>
- ДБН В.2.2-5:2023 (2023). *Захисні споруди цивільного захисту*. Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України.
- Козлов, К. П. (2011). *Київський метрополітен: Хронологія. Події. Факти*. Київ: Вид.: ВАРТО.
- Кравець, В. Г., Гайко, Г. І., Ган, А. Л., Ган, О. В., & Шайдецька, Л. В. (2024). *Геоінженерія мегаполіса: підземна урбаністика: підручник*. Київ: КП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка».
- Крисан, В. І., Крисан, В. В., Петренко, В. Д., & Тютюкін, О. Л. (2023). Аналіз результатів випробування підсилення земляного полотна армованими ґрунтоцементними палями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 23, 45-53.
- Панкратова, Н. Д., Гайко, Г. І., & Савченко, І. О. (2020). *Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій*. Київ: Наукова думка.
- Перелік ракетних ударів під час російського вторгнення* (2024). Електронний ресурс: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік_ракетних_ударів_під_час_російського_вторгнення
- Препотенська, М. (2014). *Ното Urbanus: феномен людини мегаполіса*. Дніпропетровськ: Вид. Середняк Т. К.
- Тютюкін, О. Л. (2020). *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро: Журфонд.

Н. І. НАЙКО^{1*}, А. Л. ГАН², В. В. ВАПНИЧНА³, І. О. МАТВІЙЧУК⁴

^{1*} Department of Geoengineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (050) 921 94 59, e-mail gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0002-4263-5958

² Department of Geoengineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (097) 653 05 66, e-mail gan@geobud.kiev.ua, ORCID 0000-0003-0832-1338

³ Department of Geoengineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (063) 037 28 48, e-mail vapnichna.viktoriia@ill.kpi.ua, ORCID 0000-0003-3938-4358

⁴ Department of Geoengineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37, prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (093) 930 50 56, e-mail matveychuk593@gmail.com, ORCID 0000-0002-3262-8762

ANALYSIS OF PROGRESSIVE DESIGN SOLUTIONS FOR UNDERGROUND CIVIL PROTECTION STRUCTURES

Purpose. Analysis of progressive types and structures of underground civil defense structures against air strikes, development and implementation of innovative solutions in the practice of construction and reconstruction of protective objects, especially for cases of direct impact of ammunition into the perimeter of an underground structure. **Methodology.** Comparative analysis and differentiation of protective structures, improved methods of renovation and application of existing underground facilities for a new (protective) purpose; methods of finding new technical solutions for the protection of shallow structures from air strikes. In the conditions of Russia's large-scale aggression against Ukraine, the problem of protecting the population from possible air strikes takes priority, and the use of un-

derground space forms the main direction of engineering solutions. **Findings.** A promising direction for the development of the use of the subway as a civil defense storage facility is the renovation and arrangement of tunnels not involved in transport and auxiliary operations, which can significantly increase the capacity of such storage facilities and improve the living conditions of people. Methods of renovation and arrangement of subway tunnels, cost-effective constructive solutions and methods of construction of civil defense structures. **Originality.** The differentiation of underground protective objects was carried out according to the principle of protection against air strikes in cases of direct and indirect (remote from the perimeter of the underground structure) pot-raping ammunition. For the first time, frameworks made of soil concrete, formed by jet cementation of soils, are considered as retaining structures capable of perceiving, in particular, dynamic (explosive) loads. **Practical value.** Effective introduction into the practice of underground construction of advanced technical solutions and methods of renovation and adaptation to the storage functions of existing underground structures, construction of protective structures using innovative methods, in particular, using soil concrete. Wide development of construction techniques of jet cementation of soils gives reason to believe that mastering a new method of erecting underground structures from soil concrete will not cause complications and will not take much time.

Keywords: civil defense structures; underground facilities; subway tunnels; renovation; modular warehouses; frame made of soil concrete; jet cementation

REFERENCES

- Ackroyd, P. (2012). *London Under. Paperback – International Edition*. London: Vintage Books, 202. (in English)
- Díaz, E., Salamanca-Medina, E. L., & Tomás, R. (2024). Assessment of compressive strength of jet grouting by machine learning. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(1), 102-111. (in English)
- Pankratova, N. D., Haiko, H. I., & Savchenko, I. O. (2024). Modelling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. Springer. (in English)
- Cheng, S. H., Chao, K. C., Wong, R. K., Morris, I., & Wang, M. (2023). Control of jet grouting process induced ground displacement in clayey soil. *Transportation Geotechnics*, 40, 100983. (in English)
- Vapnichna, V. V., Korobiichuk, V. V., Zuiyevska, N. V., Iskov, S. S., & Kovalevych, L. A. (2022). Obgruntuvannya sposobu ushchilnennia gruntu mizhstantsiinoho tuneliu strumynnym nahnitanniam na osnovi kompiuternoho modeliuвання. *IOP: Zemlia ta navkolyshnie seredovyshche*, T. 1, №1, 012048. IOP Publishing. (in Ukrainian)
- Hetun H., Bezklubenko I., Solomin A., Balina O. (2023). Osoblyvosti ob'ємno-planuvalnykh rishen zakhysnykh sporud tsyvilnoho zakhystu. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannya*, (67), 203-220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220> (in Ukrainian)
- DBN V.2.2-5:2023 (2023). *Zakhysni sporudy tsyvilnoho zakhystu*. Kyiv: Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. (in Ukrainian)
- Kozlov, K. P. (2011). *Kyivskiy metropoliten: Khronolohiia. Podii. Fakty*. Kyiv: Vyd.: VARTO. (in Ukrainian)
- Kravets, V. H., Haiko, H. I., Han, A. L., Han, O. V., & Shaidetska, L. V. (2024). *Heoinzheneriia mehapolisa: pidzemna urbanistyka: pidruchnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, Vyd-vo «Politekhnika». (in Ukrainian)
- Krysan, V. I., Krysan, V. V., Petrenko, V. D., & Tiutkin, O. L. (2023). Analiz rezultativ vyprobuvannya pidsylennia zemlianoho polotna armovanymy gruntotsementnymy paliamy. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, 23, 45-53. (in Ukrainian)
- Pankratova, N. D., Haiko, H. I., & Savchenko, I. O. (2020). *Rozvytok pidzemnoi urbanistyky yak systemy alternatyvnykh proiektnykh konfigurationsii*. Kyiv: Naukova dumka. (in Ukrainian)
- Perelik raketnykh udariv pid chas rosiiskoho vtorhnennia (2024)*. Elektronnyi resurs: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перелік_ракетних_ударів_під_час_російського_вторгнення (in Ukrainian)
- Prepotenska, M. (2014). *Homo Urbanus: fenomen liudyny mehapolisa*. Dnipropetrovsk: Vyd. Seredniak T. K. (in Ukrainian)
- Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії 11.09.2024.

Прийнята до друку 14.10.2024.