

УДК 625.42:[623.746:614.8]

О. Л. ТЮТЬКІН^{1*}, Д. О. БОСИЙ², О. І. САБЛІН³, Н. К. БОНДАРЕНКО⁴

^{1*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

²Каф. «Інтелектуальні системи енергопостачання», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

³Каф. «Екологічна та цивільна безпека», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІПТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 13 03, ел. пошта o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

⁴Геотехнічна лабораторія, Isotop Ltd., вул. Ярок, 20, Гедера, Ізраїль, 7075001, тел. 04-8618000, ел. пошта tasha.zirka@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

Оцінка вибухового впливу та методика виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену

Мета. Автори ставлять за мету визначити основи оцінки вибухового впливу баражуючих боеприпасів на конструкцію вестибюлю метрополітену та розробити методику виявлення безпілотних літальних апаратів (БпЛА) на базі інформаційних технологій. **Методика.** У статті проаналізовано два ймовірні сценарії, що характеризують стратегію масованої атаки БпЛА. Відзначено, що слід розглядати ці сценарії не у відриві один від одного, а в комплексі, вважаючи, що ймовірність негативного сценарію дуже висока, навіть у разі успішної реалізації позитивного. Розглянуто найпоширенішу конструкцію підземного вестибюлю (трипрогонова рама з двома рядами колон). Наведено, що важливою інформативною ознакою БпЛА під час польоту є акустичне випромінювання, яке дозволяє виявляти ці апарати в умовах, коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності. Розроблено скінченноелементну модель вестибюлю метрополітену на основі реальних геометричних розмірів за допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD. **Результати.** Для розв'язання першої задачі (негативний сценарій) проведено оцінку міцності вестибюлю метрополітену. Аналіз деформованого стану свідчить про нормальний розподіл усіх компонентів. Визначено, що еквівалентні напруження не досягають розрахункового опору для бетону C25/30, а запаси міцності в середньому становлять 1,7...4,6 раза, тобто запроєктована конструкція витримує комбіноване навантаження від власної ваги та вибухового навантаження. Для розв'язання другої задачі (позитивний сценарій) запропоновано концептуальну схему моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря. **Наукова новизна.** У статті вперше проведено оцінку вибухового впливу від баражуючого боеприпасу на конструкцію вестибюлю метрополітену. На основі цієї оцінки визначено міцність залізобетонної конструкції вестибюлю як потенційного укриття. **Практична значимість.** Розроблено методику виявлення на базі інформаційних технологій безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену.

Ключові слова: метрополітен; вестибюль; безпілотний літальний апарат (БпЛА); акустичне випромінювання; оцінка міцності; захист укриття; критична інфраструктура

Вступ

Протягом війни російської федерації проти України задокументовано низку випадків, які є воєнними злочинами та характеризують агресивну практику країни-агресора як терористичну. Свідоме застосування масованих атак баражуючих боеприпасів «Шахед–131» («Герань–1») та «Шахед–136» («Герань–2») є однією з основних тактик залякування мирного населення, оскільки потрапляння таких дронів-камікадзе, тобто безпілотних літальних

апаратів (БпЛА), найчастіше усього розраховано на дрібні руйнування об'єктів критичної інфраструктури та житлового фонду, а також на вбивство українських громадян [1].

Проте не слід відкидати можливість зміни терористичної стратегії російської федерації, під час якої масована атака дронів-камікадзе може бути спрямована виключно на мирне населення з метою геноциду [11], як це спостерігалось під час цинічно завданого бомбового удару 16 березня 2022 року по Маріупольському драматичному театрові, перед яким було

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

нанесено напис-застереження «ДІТИ», або ракетного удару 8 липня 2024 року по дитячій лікарні «Охматдит» у Києві. Безсумнівно, зважаючи на масу бойової частини (15 і 45 кілограмів БпЛА «Шахед–131» і «Шахед–136» відповідно), для масованих атак баражуючими боеприпасами можуть бути обрані лише невеликі об'єкти, зокрема й укриття. Зміна терористичної стратегії РФ досить вірогідна, зважаючи на частотність появи характерних випадків у Херсонському та Миколаївському регіонах, у яких терористичним атакам малих БпЛА (FPV-дрони зі скидом та камікадзе) були піддані автобуси, зупинки та поодинокі пішоходи.

Важливим видом укриття є об'єкти метрополітену, які під час війни більш явно проявляють своє подвійне призначення [10]. На відміну від залізобетонних міських укриттів, об'єкти метрополітену, зокрема станції глибокого та мілкого закладень, підземні переходи та вестибюлі мають значний простір і, відповідно, велику місткість [8, 9]. Широко відомо, що протягом війни об'єкти Київського, Харківського і Дніпровського метрополітенів надають захист тисячам містян, які під час ракетно-бомбових ударів можуть перебувати в цих підземних укриттях тривалий час. Відповідно, в разі зміни терористичної стратегії російської федерації можливі також і масовані атаки БпЛА на ці об'єкти, коли в них буде спостерігатися значне скупчення людей. У цьому випадку найбільш вразливими для терористичних дій, пов'язаних із застосуванням вибухових пристроїв, є саме вестибюлі і певною мірою станції метрополітену мілкого закладення (5...10 м від денної поверхні).

Для розв'язання задачі захисту вестибюлів метрополітену слід розглянути два ймовірні сценарії, що характеризують стратегію масованої атаки баражуючими боеприпасами. Причому слід розглядати ці сценарії не у відриві один від одного, а в комплексі, вважаючи, що ймовірність негативного сценарію дуже висока навіть у разі успішної реалізації позитивного. Саме наявність цих двох сценаріїв є підґрунтям того, що вказана наукова задача повинна бути комплексною і потребує двох напрямів її вирішення, що є пов'язаними між собою.

Негативний сценарій впливу БпЛА на конструкцію вестибюлю моделює падіння баражу-

ючих боеприпасів «Шахед–131» («Герань–1») та «Шахед–136» («Герань–2») поблизу об'єкта з подальшим вибухом і впливом вибухової дії на підземний об'єкт. Відповідно, задачею, що впливає з цього сценарію, є оцінка впливу вибуху на сукупну систему, що складається з дорожнього покриття, зворотної засипки та конструкції вестибюлю метрополітену. Метою цієї оцінки є з'ясування міцності вказаної конструкції.

Позитивний сценарій впливу БпЛА реалізує зменшення ймовірності його потрапляння в зону закладення вестибюлю метрополітену. Відповідно, реалізація цього сценарію полягає у виявленні баражуючих боеприпасів на підльоті до укриття з подальшим запровадженням комплексу заходів радіоелектронної боротьби або фізичного знищення БпЛА.

Не викликає сумнівів, що саме інформаційні технології [2] є найефективнішими для виявлення БпЛА [3] під час захисту укриття, яким є вестибюль станції метрополітену. Важливою інформативною ознакою БпЛА під час польоту є акустичне випромінювання, яке дозволяє виявляти їх в умовах, коли оптичні та радіолокаційні засоби не забезпечують необхідної точності [4, 5]. Акустичні хвилі, які генерують БпЛА, поширюються в просторі, і їх можуть фіксувати акустичні приймачі сигналу (мікрофони), що перетворюють акустичний тиск на електричний сигнал.

Джерелами звукових хвиль БпЛА є рухомі установки і лопаті повітряних гвинтів, частота генерованого звуку яких кратна частоті обертання колінчастого вала поршневого двигуна, кількості та частоті обертання лопатей повітряного гвинта, а інтенсивність звуку залежить від швидкості обтікання лопатей повітрям.

Для завчасного виявлення БпЛА необхідна система розподілених високочутливих акустичних приймачів, які на достатній дальності здатні з високим ступенем точності зафіксувати факт наближення літаючого апарату за його акустичним портретом, визначити його тип, напрям, швидкість і передати інформацію за призначенням [2]. Система повинна бути простою, дешевою, надійною, мати незалежне енергоживлення та можливість інтегруватися до системи оповіщення більш високого рівня.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Слід ще раз підкреслити, що розв’язання задачі захисту вестибюлю на основі негативного й позитивного сценаріїв є комплексним, оскільки навіть за 90 % ймовірності реалізації методики завчасного виявлення БпЛА залишається вірогідність вибухового впливу, який повинен бути оцінений. Також треба відзначити, що з підвищенням кількості масованих атак та числа баражуючих боєприпасів, які застосовують одночасно, ймовірність негативного сценарію зростає.

Мета

Основною метою цієї статті є запровадження основ оцінки вибухового впливу безпілотних літальних апаратів на конструкцію вестибюлю метрополітену та розробка методики виявлення баражуючих боєприпасів на базі інформаційних технологій.

Методика

Найпоширенішою конструкцією підземного вестибюлю з огороженням «стіною в ґрунті» є трипрогонова рама з двома рядами колон, виконана зі збірного залізобетону (рис. 1).

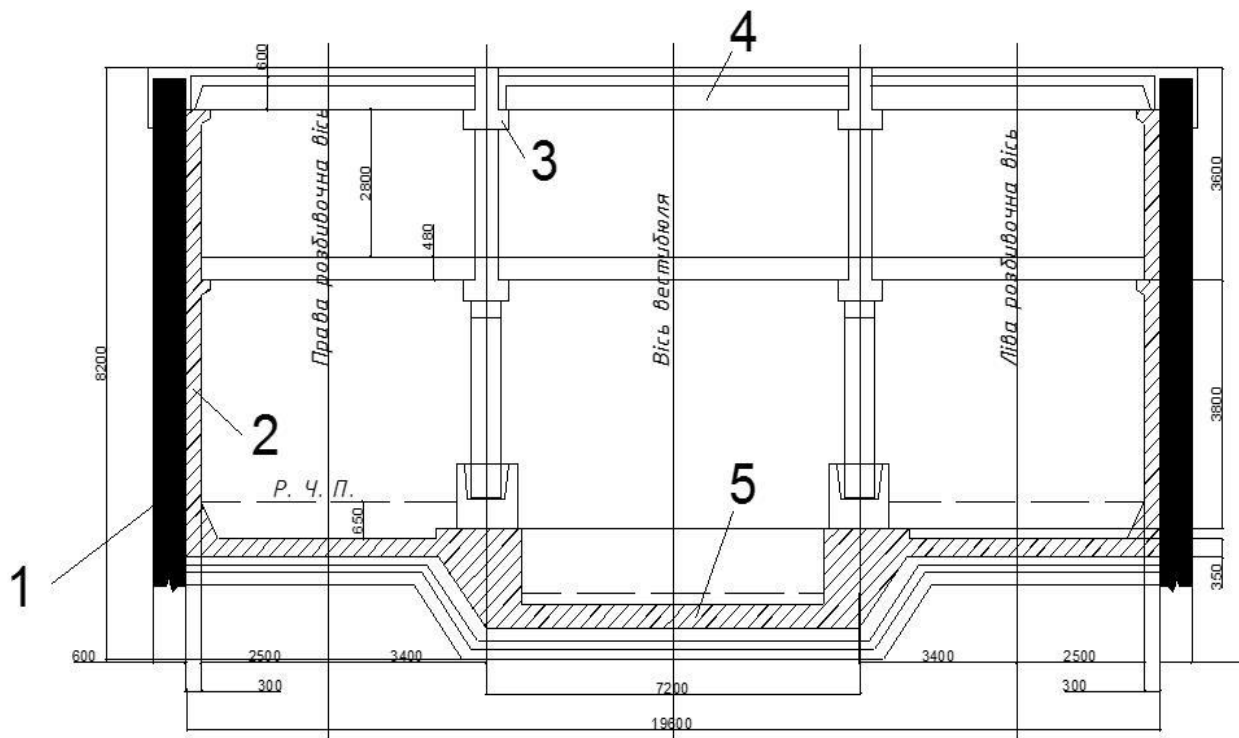


Рис. 1. Конструкція підземного вестибюлю станції мілкого закладення:

- 1 – «стіна в ґрунті»;
- 2 – несна стінка з ригелем для кріплення перекриття;
- 3 – прогін; 4 – перекриття;
- 5 – лоткова частина з монолітного бетону

Fig. 1. The structure of the underground vestibule of the shallow station:

- 1 – slurry wall;
- 2 – load-bearing wall with a crossbar for lining the floor;
- 3 – span; 4 – floor;
- 5 – tray part made of monolithic concrete

Особливістю конструкції вестибюлю є те, що на колони 4 спирається двоконсольний прогін 2, на якому розміщено ребристі плити верхнього перекриття середнього 3 і крайніх 1 про-

гонів. Плити крайніх прогонів спираються з другого боку на стінні блоки 5. Відстань між осями колон у поперечному перерізі вестибюлю призначають для потреби пропуску поїздів,

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тобто з урахуванням габариту наближення будівель станції метрополітену мілкого закладення. За цих умов визначають висоту підлоги вестибюлю від рівня головки рейки. Таким чином, мінімальна висота сходового маршу з урахуванням товщини перекриття складає 3,12 м [6].

Робота акустичної системи ідентифікації для підземного вестибюлю станції метрополітену мілкого закладення здійснюється таким чином. Масив значень акустичних сигналів, отриманий шляхом накопичення даних, які передають через мережу, побудовану за стільниковою топологією з використанням пристроїв вимірювання шуму з бездротовою передачею даних, надходить до блоку декодування. Ці пристрої розташовані вздовж захищеної зони та додатково під'єднані до інших інфраструктурних об'єктів для впровадження системи технічної діагностики. Система аналізує отриманий масив даних, розраховуючи координати безпілотного літального апарата відносно вестибюлю, щоб активувати сигнал тривоги.

Запропоновано прототип такої системи у вигляді розподілених пристроїв вимірювання технічних параметрів уздовж ділянки, який інтегровано в систему моніторингу, де пристрої вимірювання прискорень суміщені з пристроями вимірювання шуму та, за рахунок бездротової передачі даних, дозволяє виконувати просторовий аналіз та акустичну ідентифікацію повітряних загроз уздовж ділянки.

Алгоритм роботи системи акустичної ідентифікації такий. На вхід через блок декодування надходить масив значень акустичного сигналу, отриманий шляхом накопичення даних, які передають мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірювання шуму з бездротовою передачею даних, розподілених уздовж захищеної зони та під'єднаних додатково до інших інфраструктурних об'єктів для реалізації системи технічного діагностування. Система виконує аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової координати БпЛА відносно об'єкта захисту для спрацювання оповіщення.

Для впровадження запропонованого методу потрібно розробити спеціальний пристрій ви-

мірювання акустичного сигналу та інших цифрових параметрів з бездротовою передачею даних [2]. Розроблений пристрій направлений на підвищення безпеки містян, які перебувають в укритті (наприклад, вестибюлі метрополітену), та підвищення точності ідентифікації загроз в акустичному сигналі.

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що для вимірювання шуму застосовують цифровий мікрофон, до виходу якого під'єднаний пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем.

Пристрій можна налаштовувати на розрізнення звуків малої інтенсивності в необхідних частотних діапазонах, притаманних акустичним портретам БпЛА, після виділення яких він переходить із «режиму сну» в активний, що забезпечує його енергоекономічність.

Для аналізу міцності конструкції вестибюлю метрополітену розроблено детальну скінченно-елементну модель (СЕ-модель). Для найбільшої точності відтворення реальної взаємодії цієї конструкції розроблено просторову модель за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) на основі об'ємних СЕ. Більш плідним підходом до цієї проблеми можна вважати застосування цього методу в професійному розрахунковому методі, оскільки результатом, одержаним з його допомогою, є ізолінії та ізополя параметрів напружено-деформованого стану, які легко інтерпретувати.

СЕ-модель вестибюлю метрополітену побудована на основі реальних геометричних розмірів за допомогою розрахункового професійного комплексу Structure CAD, version 7.31 (SCAD) [6]. Модель основана на об'ємних скінченних елементах (19 491 вузлів, 12 288 скінченних елементів; задача середньої розмірності) і більш повно відображає роботу вестибюлю із довколишнім масивом. Після створення просторової СЕ-моделі їй надано деформаційні характеристики (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунту та залізобетону їх задано окремо (рис. 2).

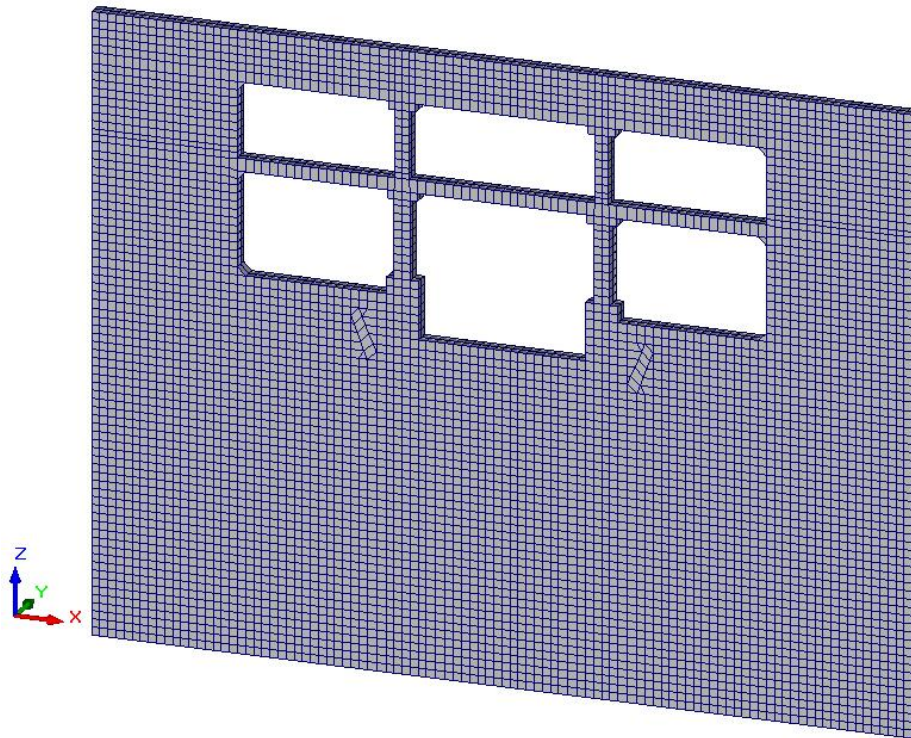


Рис. 2. Загальна СЕ-модель вестибюлю із «стіною в ґрунті» та довколишнім ґрунтом

Fig. 2. General FE-model of a vestibule with a slurry wall and surrounding soil

Деформаційні характеристики СЕ-моделі такі: 1) пісок дрібний середньої щільності, насичений водою: модуль пружності $E = 30$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$, питома вага $\gamma = 20,5$ кН/м³; 2) пісок дрібний, водонасичений: модуль пружності $E = 30$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,25$, питома вага $\gamma = 19,5$ кН/м³; 3) залізобетон конструкції та «стіни в ґрунті»: приведений модуль пружності $E = 36 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,2$, питома вага $\gamma = 24,5$ кН/м³; 4) бетон основи, товщина шару 0,6 м: модуль пружності $E = 27 \cdot 10^3$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,2$, питома вага $\gamma = 20$ кН/м³.

Після надання деформаційних характеристик на модель накладено граничні умови: 1) по нижній межі моделі – заборона по осях X , Y , Z ; 2) по боках моделі (вздовж боків, які паралельні осі тунелю) – заборона по осях X та Y ; 3) по торцях моделі (сторони, які перпендикулярні осі X) – заборона по осі Y .

Після цього виконано розрахунок на власну вагу СЕ-моделі і вибухове навантаження від баражуючого боєприпасу «Шахед–136»

(«Герань–2»), що прикладене на денній поверхні на однаковій відстані від колон [7, 12].

Результати

Для розв’язання першої задачі (негативний сценарій) проведено оцінку міцності під час розрахунку вестибюлю метрополітену. Після чисельного аналізу за допомогою Structure CAD отримані загальні результати напружено-деформованого стану конструкції вестибюлю метрополітену проаналізовано. На рис. 3 наведено результати деформованого стану СЕ-моделі вестибюлю.

Аналіз деформованого стану свідчить про нормальний розподіл обох компонентів, причому їх значення не суперечать роботі вестибюлю: максимальні вертикальні переміщення шелиги середнього залу станційної конструкції становлять 12 мм, лотка – 8 мм.

Наведені дані про деформований стан конструкції є радше ілюстративними, оскільки найбільший інтерес у дослідженні становлять напруження.

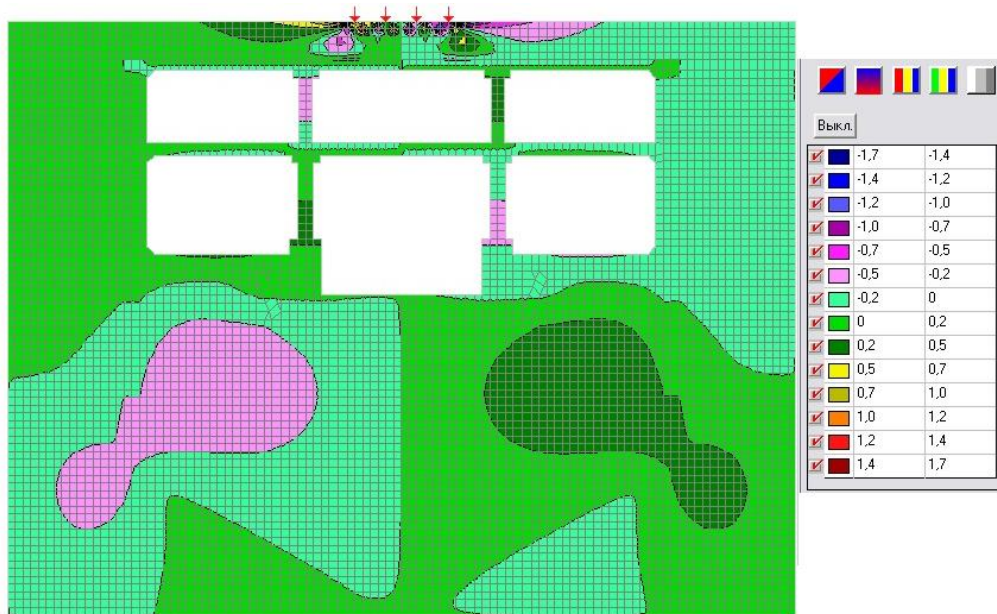
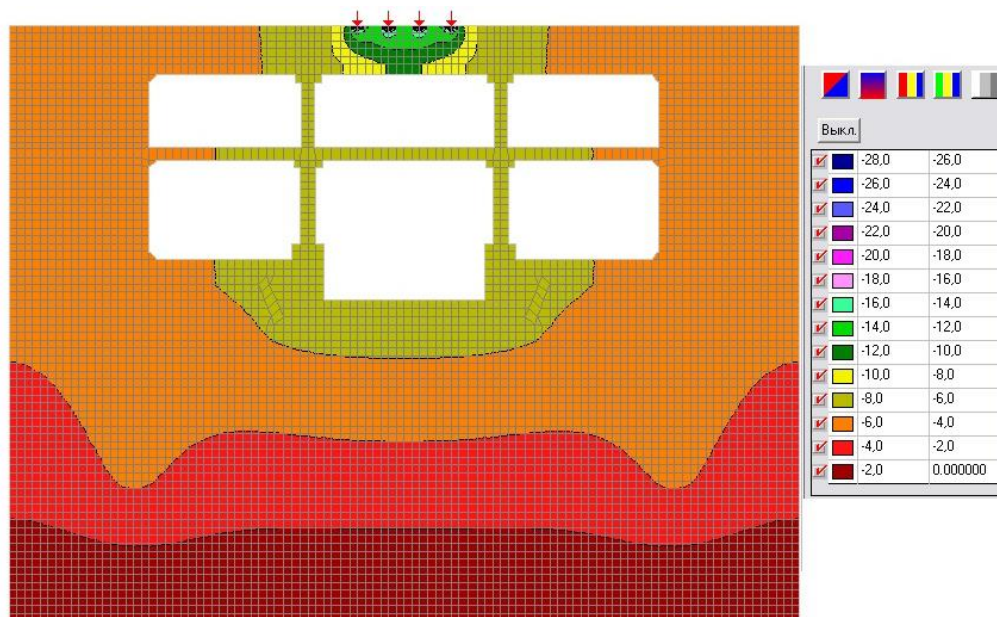
a – a*б – б*

Рис. 3. Ізополі та ізолінії горизонтальних (а) та вертикальних (б) переміщень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від вибухового навантаження

Fig. 3. Isofields and isolines of horizontal (a) and vertical (b) displacements in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from explosive loading

Для розрахунку на міцність наведено презентаційні дані напруженого стану лише щодо конструкції вестибюлю (рис. 4 і 5). Розподіл напружень у конструкції вестибюлю є стандартним і не суперечить класичним уявленням про розподіл напружень у конструкціях із кутами і

колонами. Для подальшого розрахунку конструкції вестибюлю на міцність, який буде проведено лише щодо бетону, тобто на тріщиностійкість, застосовуємо формулу четвертої теорії міцності (енергетичну), що враховує просторовий розподіл напруженого стану [6].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

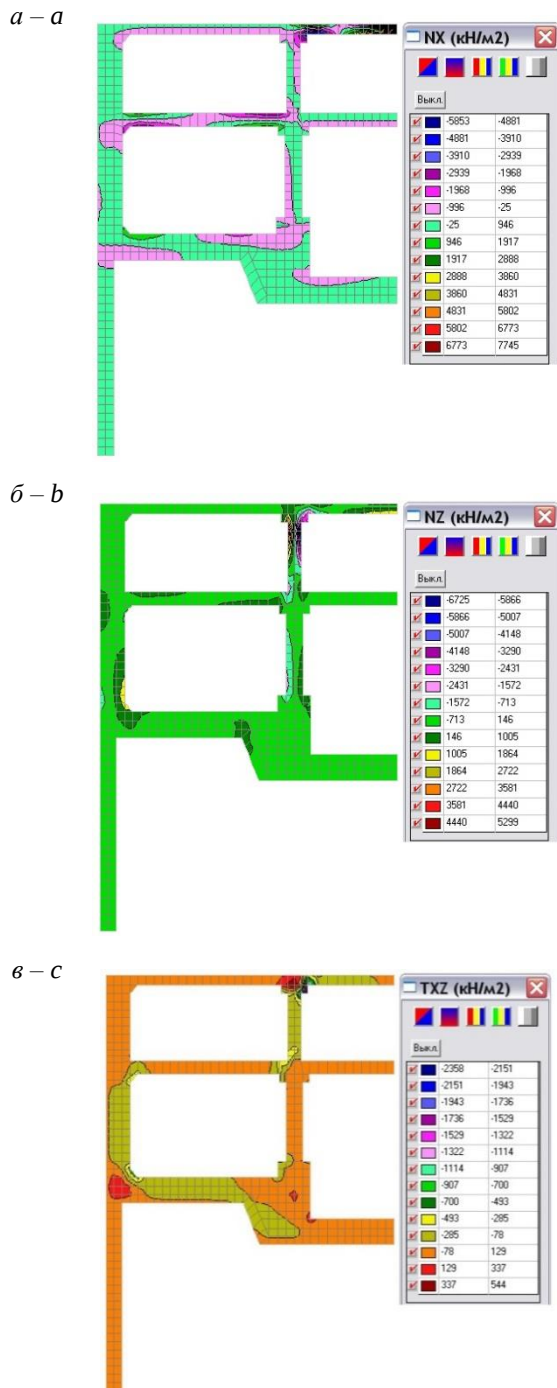


Рис. 4. Ізополя та ізолінії горизонтальних (а), вертикальних (б) та дотичних (в) напружень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від вибухового навантаження

Fig. 4. Isofields and isolines of horizontal (a), vertical (b) and tangential (c) stresses in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from explosive loading

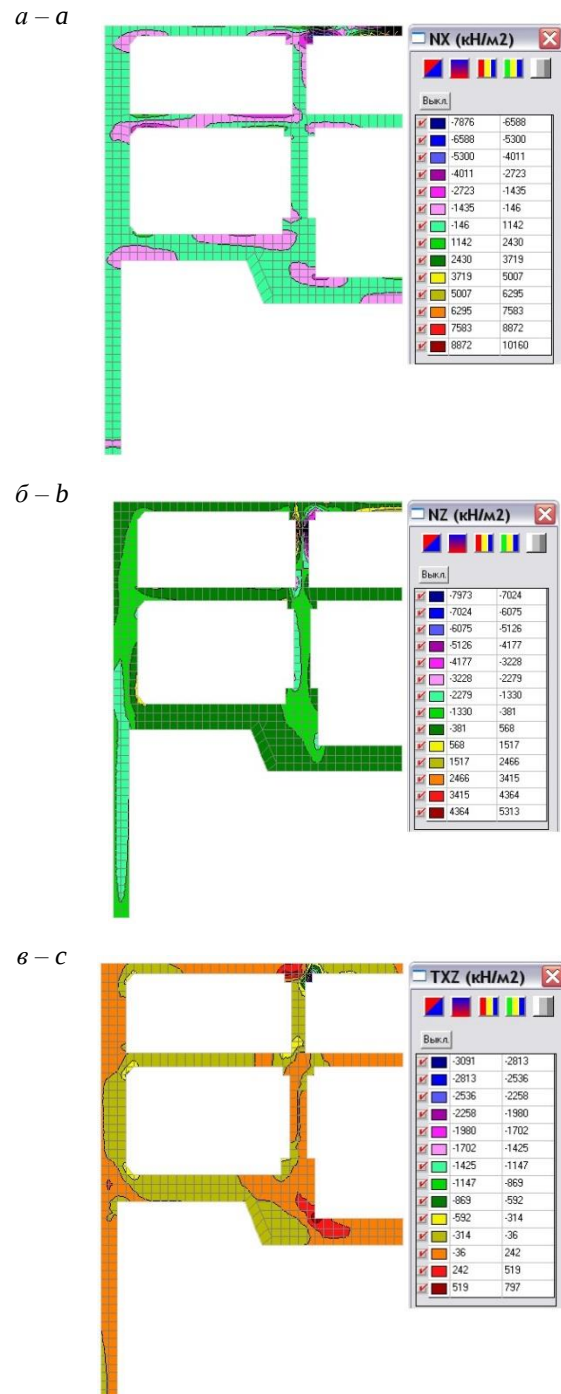


Рис. 5. Ізополя та ізолінії горизонтальних (а), вертикальних (б) та дотичних (в) напружень у фрагменті моделі (фрагмент оправи вестибюлю) від власної ваги та вибухового навантаження

Fig. 5. Isofields and isolines of horizontal (a), vertical (b) and tangential (c) stresses in a fragment of the model (fragment of the vestibule lining) from its own weight and explosive load

Як видно з аналізу рис. 4 і 5, перевірку на міцність слід провести в точках концентрації, які вказані на рис. 6.

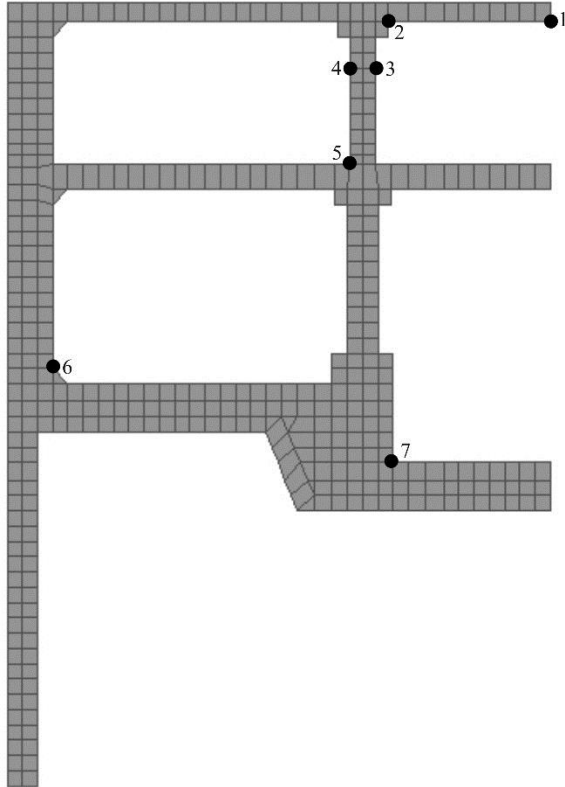


Рис. 6. Точки концентрації напружень у конструкції вестибюлю

Fig. 6. Stress concentration points in the vestibule structure

Отримання еквівалентних напружень дозволяє врахувати складний напружений стан в елементах моделі і більш точно з'ясувати поведінку конструкції в разі взаємодії її з довколишнім масивом та спектром навантажень. Розрахунок за еквівалентними напруженнями для комбінованого навантаження від власної ваги та вибухового навантаження (рис. 5) наведено в табл. 1.

Як бачимо з таблиці, еквівалентні напруження не досягають розрахункового опору для бетону С25/30, а запаси міцності в середньому становлять 1,7...4,6 рази (у точці концентрації 6 – 18,4 рази), тобто можна зробити висновок, що запроєктована конструкція витримує комбіноване навантаження від власної ваги та вибухового навантаження.

Таблица 1

Розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності

Table 1

Calculation of equivalent stresses according to the fourth strength theory

Но- мер точки	Напруження, МПа			Еквівале- нтне на- пруження, МПа / Коефіці- єнт запасу
	Нормаль- не по осі X	Нормаль- не по осі Z	Дотич- не в пло- щині XZ	
1	-7,87	+1,52	+0,24	7,24/2,9
2	-7,87	-5,13	-3,09	12,5/1,7
3	-1,44	-7,97	-0,36	8,80/2,4
4	-0,15	+5,31	-0,36	5,27/4,0
5	-2,72	-3,23	-0,59	5,26/4,0
6	-0,15	+0,57	-0,59	1,14/18,4
7	-2,72	-2,28	+0,79	4,55/4,6

Еквівалентні напруження та запас міцності в точці концентрації 2 (12,5 МПа та 1,7 рази) можна вважати задовільними і такими, що не викликають потреби у зміні конструкції.

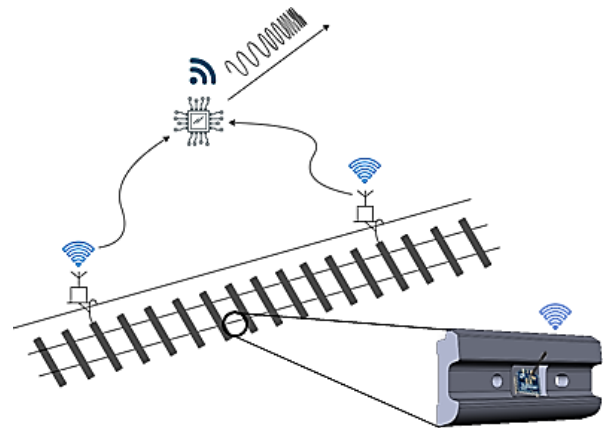


Рис. 7. Концептуальна схема моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря

Fig. 7. Conceptual scheme of monitoring the condition of ground critical infrastructure facilities in the area of the metro vestibule with the integration of an aerial threat detection system

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Для розв'язання другої задачі (позитивний сценарій) на основі досліджених технологій у статті запропоновано концептуальну схему моніторингу стану об'єктів наземної критичної інфраструктури в зоні закладення вестибюлю метрополітену з інтеграцією в систему виявлення загроз із повітря (рис. 7). Ця система використовує дві бездротові технології: ZigBee для збору даних між пристроями на відстані 75...100 метрів та LoRa для передачі критичних, узагальнених даних (на відстань до 10 км), таких як виявлення аномалій.

Система оснащена цифровим мікрофоном, під'єднаним до мікроконтролера, який дозволяє записувати звук, коли рівень акустичного сигналу перевищує заданий поріг. Після завершення запису система аналізує дані за допомогою нейронної мережі, оптимізованої для ресурсів мікроконтролера, щоб оцінити потенційні загрози та активувати миттєвий сигнал тривоги.

Наукова новизна та практична значимість

У статті вперше проведено оцінку вибухового впливу від баражуючого боєприпасу «Шахед-136» на конструкцію вестибюлю метрополітену. На основі цієї оцінки визначено міцність залізобетонної конструкції вестибюлю як потенційного укриття, яка свідчить про достатній рівень захисту людей у разі одиничного влучання баражуючого боєприпасу.

Практична значимість дослідження полягає в розробці методики виявлення безпілотних літальних апаратів для захисту вестибюлю метрополітену. Розроблена концептуальна схема моніторингу в зоні закладення вестибюлю з інтеграцією в систему виявлення загроз може бути впроваджена для підвищення безпеки людей, які використовують метрополітен як укриття.

Висновки

Отримано первинні результати важливої на сьогоднішній воєнний час задачі, а саме захисту вестибюлю метрополітену. Поставлена задача характеризується як комплексна і полягає в розвитку двох напрямів: оцінки вибухового впливу баражуючих боєприпасів та методики виявлення безпілотних літальних апаратів. У статті визначено міцність конструкції вестибюлю метрополітену за допомогою чисельного аналізу випадку вибухового впливу, а також наведено основи методики виявлення безпілотних літальних апаратів на базі інформаційних технологій.

Подальші дослідження в рамках цієї комплексної задачі заплановано продовжити для випадку масового потрапляння баражуючих боєприпасів у зону вестибюлю метрополітену з визначенням міцності та стійкості цієї конструкції, а також розвитку системи розподілених високочутливих акустичних приймачів для завчасного виявлення БпЛА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаренко О., Гончаренко Ю., Дівізінюк М., Камишенцев Г., Фаррахов О. Аналіз деяких аспектів терористичних вплив ударними дронами. *Collection of scientific papers «ЛОГОС»* (Oxford, 2 Feb. 2024). Oxford, 2024. С. 128–133. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024>
2. Босий Д. О., Саблін О. І., Потапчук І. Ю. Підвищення рівня безпеки об'єктів критичної інфраструктури транспорту на основі геопросторового аналізу акустичних портретів повітряних загроз. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. № 4. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156>
3. Горда О. В., Червяков Ю. М., Григоровський А. П. Розробка будівельних інформаційних моделей процесу дистанційного обстеження аварійних будівель з використанням безпілотних літальних апаратів. *Наука та прогрес транспорту*. 2022. № 3–4 (99–100). С. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276530>
4. Сокольський С. О., Мовчанюк А. В. Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2021. № 87. С. 46–55. DOI: <https://doi.org/10.20535/RADAR.2021.87.46-55>
5. Сухаревський О. І., Василець В. О., Нечитайло С. В., Резніченко О. А., Кудряшов Г. В. Дослідження радіолокаційних характеристик моделі баражуючого боєприпасу “Shahed-136”. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 2 (51). С. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07>
6. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій*. Дніпро : Журфонд. 2020. 187 с.

7. Carter A. B., Schwartz D. N. *Ballistic missile defense*. Brookings Institution Press. 2010. 446 p.
8. Cherry C., Loukaitou-Sideris A., Wachs M. Subway station design and management: Lessons from case studies of contemporary terrorist incidents. *Journal of Architectural and Planning Research*. 2008. Vol. 25. Iss. 1. P. 76–90.
9. Hu Z., Jiang N., Zhang Y., Xia Y., Zhou C. Propagation of shock wave and structure dynamic response of explosion in a subway station: a case study of Wuhan subway station. *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22. Iss. 6. P. 1453–1469. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21298>
10. Kameli M., Zarei S., Kalantari M., Nejad E. S. Criteria of Passive Defense in Subway Stations. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 2014. Vol. 4. Iss. 3. P. 298–304.
11. Oprean L.-G. Artillery and drone action issues in the war in Ukraine. *Scientific Bulletin*. 2023. Vol. 28. Iss. 1. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008>
12. Tiutkin A. L. Study of the main parameters of the explosive effect for practical calculations of the strength and stability of tunnel structures. *Science and Transport Progress*. 2006. Vol. 12. P. 208–214. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2006/18870>

O. L. TIUTKIN^{1*}, D. O. BOSYI², O. I. SABLIN³, N. K. BONDARENKO⁴

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-475

²Dep. «Intelligent Energy Supply Systems», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 25, e-mail d.o.bosyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1818-2490

³Dep. «Environmental and Civil Security», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 13 03, e-mail o.i.sablin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-6784-648X

⁴Geotechnical Laboratory, Isotop Ltd., 20 Yarok St., Geder, Israel, 7075001, tel. 04-8618000, e-mail tasha.zirka@gmail.com, ORCID 0000-0003-0804-7500

Assessment of Explosive Impact and Methods for Detecting Unmanned Aerial Vehicles During Protection of the Metro Vestibule

Purpose. The authors set the goal of determining the basis for assessing the explosive impact of loitering munitions on the structure of the metro vestibule and developing a method for detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) based on information technology. **Methodology.** The article analyzes two probable scenarios that characterize the strategy of a massive UAV attack. It is noted that these scenarios should be considered not in isolation from each other, but in combination, considering that the probability of a negative scenario is very high, even with the successful implementation of a positive one. The most common design of an underground vestibule (a three-span frame with two rows of columns) is considered. It is shown that an important informative feature of a UAV during flight is acoustic radiation, which allows detecting UAVs in conditions where optical and radar means do not provide the necessary accuracy. A finite element model of the metro vestibule was developed, which was built on the basis of real geometric dimensions using the professional calculation complex Structure CAD. **Findings.** To solve the first problem (negative scenario), an assessment of the strength of the metro vestibule was carried out. Analysis of the deformed state indicates a normal distribution of all components. It was determined that the equivalent stresses do not reach the design resistance for C25/30 concrete, and the safety margins on average reach 1.7...4.6 times, i.e. the designed structure withstands the combined load from its own weight and explosive load. To solve the second problem (positive scenario), a conceptual scheme for monitoring the condition of ground critical infrastructure objects in the area of laying the metro vestibule with the integration of an air threat detection system is proposed. **Originality.** The article first assesses the explosive impact of the loitering munition on the structure of the metro vestibule. Based on this assessment, the strength of the reinforced concrete structure of the vestibule as a potential shelter is determined. **Practical value** lies in the development of a method for detecting unmanned aerial vehicles based on information technology during the protection of the metro vestibule.

Keywords: metro; vestibule; unmanned aerial vehicle (UAV); acoustic radiation; strength assessment; shelter protection; critical infrastructure

REFERENCES

1. Azarenko, O., Honcharenko, Yu., Diviziniuk, M., Kamyshentsev, H., & Farrakhov, O. (February, 2024). Analiz deiakyykh aspektiv terorystychnykh vplyv udarnymy dronamy. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ»* (pp. 128-133). Oxford, United Kingdom. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-02.02.2024.024> (in Ukrainian)
2. Bosyi, D. O., Sablin, O. I., & Potapchuk, I. Yu. (2024). Increasing the Security Level of Critical Transport Infrastructure Facilities Based on Geospatial Analysis of Acoustic Portraits of Air Threats. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 175(4), 147-156. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-175-4-147-156> (in Ukrainian)
3. Gorda, O. V., Chervyakov, Yu. M., & Hryhorovskiy, A. P. (2022). Development of building information models of the process of remote surveying of emergency buildings using uavs. *Science and Transport Progress*, 3-4(99-100), 79-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2022/276530> (in Ukrainian)
4. Sokolskyi, S. O., & Movchanyuk, A. V. (2021). Overview of Detection and Localization Methods of Small Unmanned Aerial Vehicles. *Visnyk NTUU KPI Serii A – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 87, 46-55. DOI: <https://doi.org/10.20535/radap.2021.87.46-55> (in Ukrainian)
5. Sukharevsky, O. I., Vasilets, V. O., Nechytailo, S. V., Reznichenko, O. A., & Kudriashov, H. V. (2023). Radar characteristics study of the model of “Shahed-136” barraging munition. *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, 2(51), 56-62. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.07> (in Ukrainian)
6. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruksii*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
7. Carter, A. B., & Schwartz, D. N. (2010). *Ballistic missile defense*. Brookings Institution Press. (in English)
8. Cherry, C., Loukaitou-Sideris, A., & Wachs, M. (2008). Subway station design and management: Lessons from case studies of contemporary terrorist incidents. *Journal of Architectural and Planning Research*, 25(1), 76-90. (in English)
9. Hu, Z., Jiang, N., Zhang, Y., Xia, Y., & Zhou, C. (2020). Propagation of shock wave and structure dynamic response of explosion in a subway station: a case study of Wuhan subway station. *Journal of Vibroengineering*, 22(6), 1453–1469. DOI: <https://doi.org/10.21595/jve.2020.21298> (in English)
10. Kameli, M., Zarei, S., Kalantari, M., & Nejad, E. S. (2014). Criteria of Passive Defense in Subway Stations. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 4(3), 298-304. (in English)
11. Oprean, L.-G. (2023). Artillery and Drone Action Issues in the War in Ukraine. *Scientific Bulletin*, 28(1), 73-78. DOI: <https://doi.org/10.2478/bsaft-2023-0008> (in English)
12. Tiutkin, A. L. (2006). Study of the main parameters of the explosive effect for practical calculations of the strength and stability of tunnel structures. *Science and Transport Progress*, 12, 208-214. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2006/18870> (in English)

Надійшла до редколегії: 07.02.2025

Прийнята до друку: 13.06.2025