

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 625.712.35:504.6

Г. І. ГАЙКО^{1*}, І. О. САВЧЕНКО², В. П. ТАРАСЮК³, Д. О. БЕСПАЛОВ⁴

^{1*}Каф. геоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, корп. 22, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (050) 921 94 59, ел. пошта gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0002-4263-5958

²Каф. математичних методів системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, корп. 22, Київ, Україна, 03056, тел. +38 (050) 387 16 88, ел. пошта savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³Каф. міського будівництва, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037, тел. +38 (097) 396 93 24, ел. пошта tarasyuk90@gmail.com, ORCID 0000-0003-4762-5668

⁴Каф. міського будівництва, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037, тел. +38 (067) 943 51 19, ел. пошта dmitry.bespalov@me.com, ORCID 0000-0002-0778-5627

Автомобільні тунелі як фактор кліматичної нейтральності великого міста

Мета. Визначення пріоритетності розвитку мережі автомобільних тунелів, передбачених у Генеральному плані м. Києва, з урахуванням задач кліматичної нейтральності міста; системне оцінювання впливу автомобільного тунелю на функціонування міста, зміну трафіку та екологічних (кліматичних) показників. **Методика.** Модифікований метод морфологічного аналізу урбанізованих територій, який враховував групи структурно-функціональних і кліматичних (екологічних) факторів та ризиків, зокрема: забруднення повітря (автомобільні викиди), протяжність маршруту сполучення, дорожні затори, шум і динамічні впливи тощо. Транспортна модель м. Києва була представлена у вигляді двох складових – моделі транспортної пропозиції (складається з елементів транспортної системи міста: вулично-дорожня мережа, маршрути громадського транспорту різних типів, зупинки тощо) та моделі транспортного попиту (характеризує цілі вибору режимів і маршрутів переміщення, параметри мобільності населення тощо). Синтез цих двох методик розглядається авторами як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. **Результати.** Розроблено системну модель підтримки прийняття рішень щодо визначення пріоритетності та ранжування (доцільної черговості) будівництва автомобільних тунелів у м. Києві з урахуванням фактору кліматичної нейтральності, проведена порівняльна оцінка й визначений найбільш рейтинговий автомобільний тунель (з трасою від Галицької площі до початку Броварського проспекту). Тестування сценарію введення зазначеного тунелю в транспортну модель м. Києва дозволило оцінити загальні зміни трафіка та довело можливість скорочення викидів CO₂ на понад 4 % від обсягів загальної емісії оксиду вуглецю по місту. **Наукова новизна.** Вперше побудована комплексна морфологічна модель для оцінки системи автомобільних тунелів з урахуванням впливу на ключові фактори ризику, що дозволило оцінити альтернативні конфігурації (сценарії) з урахуванням заданої пріоритетності (ваги) того чи іншого ризику, зокрема – викидів CO₂; розкрита кількісна кореляція між трасою автомобільного тунелю, його впливом на міський трафік та зменшенням викидів CO₂. **Практична значимість.** В роботі на прикладі м. Києва вперше доведений високий вплив автомобільних тунелів на зменшення викидів парникових газів (одночасно з вирішенням низки транспортних, територіальних та без пекових проблем), що дає підстави розглядати розвиток підземної транспортної інфраструктури як вагомому складову забезпечення кліматичної нейтральності та сталого розвитку великих міст. **Грантова підтримка.** Дослідження виконане в рамках рамкової програми Horizon Europe, проєкт «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», грантова угода: 101148374, і профінансоване Європейським Союзом.

Ключові слова: планування міст; підземне будівництво; кліматична нейтральність; емісія CO₂; автомобільні тунелі; міський трафік; системний аналіз; транспортна модель

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Вступ

Для забезпечення процесу системної трансформації великих міст світу та України на шляху до кліматичної нейтральності особливого значення набуває дослідження інноваційних підходів до міського планування, спрямованих на максимальне скорочення викидів парникових газів. Викиди від транспорту в середньому становлять чверть від загальних викидів парникових газів у країнах ЄС, а в містах цей показник сягає до 60...70 % (частина промисловості та енергетики – близько 30...40 %) [3, 10]. Узвичаєними напрямками скорочення транспортних викидів є розвиток автомобільної техніки, зокрема – вдосконалення традиційних двигунів і випуск електромобілів; розширення обсягів перевезень пасажирським транспортом (переважно електричним); поширення велосипедного руху і розвиток міської велосипедної інфраструктури тощо. Зменшення викидів CO₂ стримується тим, що основним видом транспорту й надалі залишається приватний автомобіль, більшість якого працює на бензині або дизельному паливі, і ця тенденція збережеться принаймні у середній перспективі [10, 11]. Тому кліматичний перехід потребує суттєвого вдосконалення міського трафіку, що в умовах майже вичерпаних можливостей збільшення щільності вулично-дорожньої мережі, потребує інноваційних підходів і значною мірою може бути досягнуто розвитком підземної транспортної інфраструктури [1, 9, 12]. Використання міського підземного простору як ефективного інструменту розвантаження вулично-дорожньої мережі та сприяння кліматичній нейтральності міста, спирається на можливості збільшити швидкість транспортного руху не тільки автомобільними тунелями, але й прилеглими (і навіть віддаленими) автомагістралями. Це досягається шляхом перерозподілу транспортних потоків між наземною та підземною інженерно-транспортною інфраструктурою, ліквідацією затримок і навіть простоїв автомобілів, зменшення аварійних ситуацій, а також властивостями автомобільних тунелів забезпечувати найкоротші відстані пересування без перешкод (відсутність перетинів тощо) та змогою відведення та утилізації автомобільних викидів у підземному просторі [1]. Крім того, розвиток підземної інженерно-транспортної інфраструк-

тури в умовах воєнних і терористичних загроз суттєво підвищує безпеку й надійність транспортного сполучення, а транспортні тунелі в разі потреби можуть виконувати функції захисних споруд для цивільного населення [2].

Для збільшення ефективності вулично-дорожньої мережі, поліпшення руху трафіку й зв'язків між окремими районами (зокрема лівим і правим берегами Дніпра) під час розробки різних редакцій і проєктів Генерального плану м. Києва [15], в основному розглядалися 8 варіантів автомобільних тунелів (рис. 1), проте повоєнне відновлення столиці потребує уточнення цих рішень й визначення доцільності й пріоритетності будівництва підземних об'єктів з урахуванням кліматичних і безпекових ризиків.

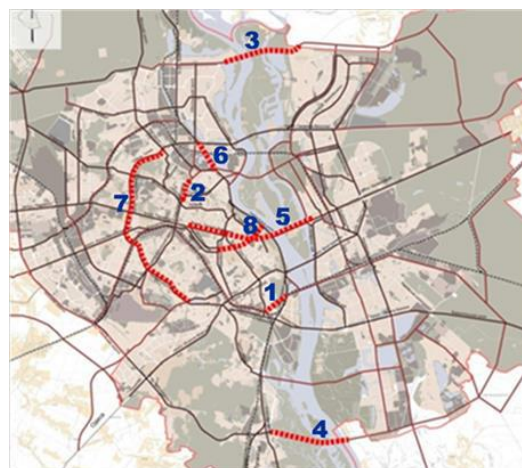


Рис. 1. Схема автомобільних тунелів
Fig. 1. Scheme of car tunnels

Мета

Метою роботи є системна оцінка пріоритетності розвитку мережі автомобільних тунелів з урахуванням задач кліматичної нейтральності міста, а також дослідження впливу найбільш рейтингового автомобільного тунелю на функціонування транспортної системи міста, зміну перерозподілу трафіку, екологічні (кліматичні) показники.

Методика

Оцінювання впливу побудови автомобільного тунелю на функціонування міста є досить складною задачею, що характеризується рядом невизначеностей різної природи.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

По-перше, зони навколо кінців (порталів) автомобільного тунелю можуть бути різномірними, мати просторово розподілені характеристики які по різному визначатимуть ефективність побудови автомобільного тунелю на відповідній ділянці. Крім того, неможливо чітко окреслити межі зони впливу автомобільного тунелю.

По-друге, характеристики можуть також варіюватись у часі: такі фактори, як інтенсивність і середня швидкість дорожнього руху, пропускна здатність вулиць і доріг, можуть змінюватись залежно від часу доби, сезону тощо. Також, оскільки потенційна побудова автомобільного тунелю є майбутньою подією, статистичні дані дають лише приблизну оцінку.

По-третє, деякі важливі характеристики є нечіткими, невимірюваними або суб'єктивно вимірюваними – наприклад, відношення ділянки до центру міста, або належність елемента вулично-дорожньої мережі до критичної інфраструктури.

Через це методи, побудовані на безпосередньому багатокритеріальному оцінюванні – такі як, наприклад, метод аналізу ієрархій, що був застосований в роботі [8], можуть надмірно спрощувати проблему, ігноруючи складні взаємозв'язки між великою кількістю характеристик, які визначають вплив автомобільного тунелю на функціонування транспортної системи міста.

Для повноцінного розгляду цієї задачі пропонується використати модифікований метод морфологічного аналізу (МММА). В цілому, метод морфологічного аналізу застосовувався різними авторами для урбаністичних задач, зокрема для аналізу транспортної системи міста на основі характеристик автомобілів, руху транспорту і стану доріг [14]; створення комплексного підходу до побудови сценаріїв автоматизації, електрифікації і цифровізації транспортного сектору [13]; створення системи оцінювання поточного стану транспортної системи і потенційних переходів між цими станами для міста, з метою конструювання стратегій [6]. Слід зазначити, що морфологічний аналіз в більшості робіт використовується виключно як спосіб структуризації складної проблеми, без розширених аналітичних можливостей.

Авторами статті вже неодноразово успішно використовувалась модифікація методу морфо-

логічного аналізу для складних системних задач, зокрема, пов'язаних із інженерно-транспортною інфраструктурою міста і підземним будівництвом, зокрема оцінювання ділянок будівництва підземних паркінгів [12].

Ідеєю МММА є представлення складних об'єктів з невизначеністю як суперпозицій великої кількості можливих конфігурацій значень заданих параметрів. Для конфігурацій визначаються ймовірності з урахуванням підсилення або пригнічення деяких пар значень параметрів, що в свою чергу дозволяє визначити більш об'єктивні оцінки параметрів з урахуванням взаємозв'язків між ними. Як правило, за цим слідує другий етап, де на основі розрахованих значень оцінюються альтернативи рішень або наслідків, які вже можуть бути використані в процесі прийняття рішення.

Для даної задачі на першому етапі розглядались характеристики ділянок навколо кінців (порталів) автомобільного тунелю, тоді як на другому етапі оцінювались параметри, пов'язані з прийняттям рішення щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю, зокрема ступеню його впливу на різні фактори ризику.

Для якісного і всебічного оцінювання впливу автомобільного тунелю до набору параметрів на першому етапі пред'являються наступні вимоги:

- набір параметрів має бути достатньо широким і різномірним, охоплюючи більшість аспектів, які важливі для оцінювання впливу автомобільного тунелю;

- при цьому набір параметрів має бути придатний для обробки (до 10 параметрів), і уникати дублювання, тобто не описувати одні й ті ж характеристики;

- кожний параметр повинен бути пов'язаним хоча б із одним із аспектів впливу автомобільного тунелю;

- кожний параметр повинен мати альтернативні значення, такі що в загальному випадку зона впливу автомобільного тунелю не може бути описана лише одним із них через невизначеності, вказані вище;

- параметри повинні являти собою об'єктивні характеристики, навіть якщо їх важко або неможливо виміряти.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

В результаті було обрано 10 параметрів, які можна об'єднати в три групи: фактори районування міста (параметри 1...3); фактори дорожнього руху (параметри 4...8); фактори критичної інфраструктури (параметри 9, 10):

1. Тип забудови в районі потенційного автомобільного тунелю (житлова забудова; адміністративна або комерційна забудова; архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти; парки, зони відпочинку; промислова забудова; незабудовані території).

2. «Фактор середмістя» – відношення автомобільного тунелю до транспортної системи міста (ділянка розташована в зоні середмістя; ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті; ділянка поза середмістям загальноміського значення; ділянка поза середмістям місцевого значення).

3. Щільність населення в зоні потенційного автомобільного тунелю (до 150 осіб/га; 150...200 осіб/га; 200...300 осіб/га; більше 300 осіб/га).

4. Добовий маятниковий рух працівників за маршрутом потенційного автомобільного тунелю (низький; середній; високий).

5. Щільність вулично-дорожньої мережі в районі потенційного автомобільного тунелю (0,5...1 км/км²; 1...1,5 км/км²; 1,5...2,2 км/км²; 2,2...3 км/км²).

6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік» (до 20 км/год; 20...40 км/год; більше 40 км/год).

7. Наземна зв'язаність кінців автомобільного тунелю магістралями (незадовільна – немає прямих шляхів, довгі об'їзди з суттєвими перешкодами; частково задовільна – один прямий шлях з певними перешкодами; задовільна – один магістральний шлях, або декілька альтернативних шляхів із певними перешкодами; добра – більше одного магістрального шляху).

8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного автомобільного тунелю (погана – вузькі магістралі, велика кількість перетинів, особливо нерегульованих, припарковані автомобілі; середня – магістралі середньої ширини, декілька перетинів, переважно регульованих; висока – широкі магістралі, мало перетинів, перетини регульовані).

9. Ступінь критичності об'єкту інженерно-транспортної інфраструктури (об'єкт критичної

інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам лише з великими втратами; об'єкт критичної інфраструктури, функції якого можуть бути передані іншим об'єктам з помірними втратами; об'єкт транспортної інфраструктури, що не належить до критичної).

10. Стан вразливості інженерно-транспортної інфраструктури (високий; середній; низький).

У вигляді морфологічної таблиці ці параметри представлені в табл. 1.

На другому етапі була побудована морфологічна таблиця, яка містить параметри, необхідні для підтримки прийняття рішень щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю. Ефект від побудови автомобільного тунелю є комплексним, і може вплинути в різній мірі на ряд факторів ризику, серед яких можна виділити шість основних:

P1. Забруднення повітря (викиди шкідливих вихлопних газів).

P2. Шум і динамічні впливи (гул двигунів, лягання трамваїв, вібрації та ін.).

P3. Дорожні затори (зменшення середньої швидкості руху, порушення функції транспорту, підвищені викиди шкідливих газів).

P4. Дорожні аварії (надмірні затримки, травмування людей).

P5. Протяжність маршруту сполучення.

P6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів.

Таким чином, до морфологічної таблиці другого етапу увійшло вісім параметрів:

А. Доцільність побудови автомобільного тунелю (доцільний; недоцільний).

В. Вагомість факторів ризику на ділянці (забруднення повітря; шум і динамічні впливи; дорожні затори; дорожньо-транспортні пригоди; протяжність маршруту сполучення; вразливість внаслідок воєнних атак або терактів).

Решта параметрів С...Н мають однакову структуру, описуючи вплив автомобільного тунелю на кожний із факторів ризику P1...P6, з чотирма альтернативами: не впливає; частково мінімізує; помірно мінімізує; суттєво мінімізує.

Загальний вигляд морфологічної таблиці другого етапу показано в табл. 2.

Таблиця 1

Характеристики ділянки потенційного тунелю

Table 1

Characteristics of the potential tunnel site

1. Тип забудови	2. Фактор середмістя		3. Щільність населення	4. Маятниковий рух працівників	5. Щільність вулично-дорожньої мережі
1.1. Житлова забудова	2.1. Ділянка розташована в зоні середмістя		3.1. До 50 осіб/га	4.1. Низький	5.1. 0,5...1 км/км ²
1.2. Адміністративні будівлі, комерційна забудова	2.2. Ділянка поза середмістям, але суттєво впливає на автомобільний рух у середмісті		3.2. 50...100 осіб/га	4.2. Середній	5.2. 1...1,5 км/км ²
1.3. Архітектурні пам'ятки й туристичні об'єкти	2.3. Ділянка поза середмістям загальноміського значення		3.3. 100...200 осіб/га	4.3. Високий	5.3. 1,5...2 км/км ²
1.4. Парки, зони відпочинку	2.4. Ділянка поза середмістям місцевого значення		3.4. Більше 200 осіб/га		5.4. 2...2,5 км/км ²
1.5. Промислова забудова					
1.6. Незабудовані території					
6. Середня швидкість автомобільного руху у години «пік»	7. Наземна зв'язаність кінців автомобільного тунелю автошляхами	8. Пропускна здатність наземних шляхів	9. Ступінь критичності об'єкту інженерно-транспортної інфраструктури		10. Стан вразливості інженерно-транспортної інфраструктури
6.1. до 20 км/год	7.1. Незадовільна	8.1. Погана	9.1. Незамінний об'єкт критичної інфраструктури		10.1. Високий
6.2. 20...40 км/год	7.2. Частково задовільна	8.2. Середня	9.2. Частково замінний об'єкт критичної інфраструктури		10.2. Середній
6.3. понад 40 км/год	7.3. Задовільна	8.3. Висока	9.3. Об'єкт транспортної інфраструктури, що не належить до критичної		10.3. Низький
	7.4. Добра				

Таблиця 2

Параметри рішення щодо доцільності і пріоритетності побудови автомобільного тунелю

Table 2

Decision parameters regarding the feasibility and priority of building a car tunnel

А. Доцільність автомобільного тунелю	В. Вагомість факторів ризику на ділянці	С. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Забруднення повітря»	Д. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Шум і динамічні впливи»
А.1. Доцільний	В.1. Забруднення повітря	С.1. Не впливає	Д.1. Не впливає
А.2. Недоцільний	В.2. Шум і динамічні впливи	С.2. Частково мінімізує	Д.2. Частково мінімізує
	В.3. Дорожні затори	С.3. Помірно мінімізує	Д.3. Помірно мінімізує
	В.4. Дорожньо-транспортні пригоди	С.4. Суттєво мінімізує	Д.4. Суттєво мінімізує
	В.5. Протяжність маршруту сполучення		
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів		
Е. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Дорожні затори»	Ф. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Дорожньо-транспортні пригоди»	Г. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Протяжність маршруту сполучення»	Н. Вплив побудови автомобільного тунелю на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»
Е.1. Не впливає	Ф.1. Не впливає	Г.1. Не впливає	Н.1. Не впливає
Е.2. Частково мінімізує	Ф.2. Частково мінімізує	Г.2. Частково мінімізує	Н.2. Частково мінімізує
Е.3. Помірно мінімізує	Ф.3. Помірно мінімізує	Г.3. Помірно мінімізує	Н.3. Помірно мінімізує
Е.4. Суттєво мінімізує	Ф.4. Суттєво мінімізує	Г.4. Суттєво мінімізує	Н.4. Суттєво мінімізує

Результати

Результати морфологічного аналізу системи автомобільних тунелів. Для побудованої системи морфологічних таблиць була проведена розрахункова процедура МММА. Вхідні оцінки в методі визначались на основі Генерального плану м. Києва, транспортної схеми, інструментів Google Maps, геопросторових та інших допоміжних джерел даних. В результаті були отримані оцінки, наведені в табл. 3.

Агрегуючий параметр «А. Доцільність будівництва» дозволяє зробити висновки щодо загальних пріоритетів будівництва автомобільних

тунелів. Як видно з табл. 3, будівництво всіх автомобільних тунелів, передбачених Генеральним планом м. Києва, є скоріше доцільним, ніж недоцільним, при цьому найбільшу оцінку сприятливості мають тунелі 3, 4, 5, що з'єднують правий і лівий береги Дніпра. Це пояснюється їх здатністю протидіяти фактору ризику, пов'язаному із військовими загрозами, який робить суттєвий внесок в агреговану оцінку.

Для визначення найбільш пріоритетних (рейтингових) автомобільних тунелів з точки зору кліматичної нейтральності необхідно розглянути здатність потенційного автомобільного тунелю мінімізувати фактори ризику «P1. За-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

бруднення повітря», «Р3. Дорожні затори» (сповільнена швидкість і підвищений час простою автомобілів призводять до збільшення кількості викидів вихлопних газів), «Р5. Протяж-

ність маршруту сполучення» (довший час руху також пропорційно збільшує викиди).

Порівняння автомобільних тунелів за впливом на ці фактори ризику показане на рис. 2–4.

Таблиця 3

Впливи тунелів 1...8 на фактори ризику

Table 3

Impacts of tunnels 1...8 on risk factors

Параметр	Альтернатива	Тунель							
		1	2	3	4	5	6	7	8
А. Доцільність будівництва	А.1. Доцільний	0,750	0,977	0,993	0,997	0,998	0,976	0,886	0,973
	А.2. Недоцільний	0,250	0,023	0,007	0,003	0,002	0,024	0,114	0,027
	В.1. Забруднення повітря	0,152	0,062	0,031	0,020	0,051	0,044	0,150	0,081
	В.2. Шум і динамічні впливи	0,110	0,032	0,018	0,008	0,029	0,020	0,093	0,054
В. Вагомість факторів ризику на ділянці	В.3. Дорожні затори	0,274	0,379	0,276	0,315	0,331	0,439	0,352	0,331
	В.4. Дорожньо-транспортні пригоди	0,141	0,036	0,049	0,049	0,029	0,037	0,081	0,050
	В.5. Протяжність маршруту сполучення	0,184	0,331	0,294	0,317	0,324	0,300	0,190	0,303
	В.6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	0,139	0,160	0,332	0,291	0,236	0,161	0,133	0,182
С. Вплив на фактор «Забруднення повітря»	С.1. Не впливає	0,013	0,003	0,019	0,021	0,000	0,007	0,001	0,002
	С.2. Частково мінімізує	0,266	0,230	0,274	0,298	0,104	0,296	0,139	0,191
	С.3. Помірно мінімізує	0,463	0,577	0,599	0,631	0,543	0,570	0,457	0,525
	С.4. Суттєво мінімізує	0,259	0,189	0,108	0,050	0,353	0,127	0,404	0,282
Д. Вплив на фактор «Шум і динамічні впливи»	Д.1. Не впливає	0,043	0,027	0,097	0,100	0,011	0,044	0,014	0,018
	Д.2. Частково мінімізує	0,318	0,476	0,502	0,625	0,325	0,546	0,265	0,333
	Д.3. Помірно мінімізує	0,354	0,310	0,270	0,215	0,377	0,273	0,368	0,368
	Д.4. Суттєво мінімізує	0,286	0,187	0,130	0,061	0,287	0,136	0,353	0,281
Е. Вплив на фактор «Дорожні затори»	Е.1. Не впливає	0,076	0,002	0,005	0,001	0,000	0,003	0,013	0,002
	Е.2. Частково мінімізує	0,390	0,081	0,138	0,086	0,060	0,097	0,283	0,131
	Е.3. Помірно мінімізує	0,308	0,326	0,357	0,362	0,276	0,382	0,334	0,337
	Е.4. Суттєво мінімізує	0,225	0,591	0,499	0,552	0,663	0,519	0,370	0,530

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Продовження таблиці 3

Continuation of Table 3

Параметр	Альтернатива	Тунель							
		1	2	3	4	5	6	7	8
F. Вплив на фактор «Дорожньо-транспортні пригоди»	F.1. Не впливає	0,232	0,074	0,337	0,616	0,015	0,316	0,030	0,048
	F.2. Частково мінімізує	0,367	0,472	0,372	0,238	0,438	0,375	0,395	0,457
	F.3. Помірно мінімізує	0,239	0,299	0,200	0,105	0,329	0,208	0,308	0,308
	F.4. Суттєво мінімізує	0,162	0,155	0,092	0,041	0,218	0,102	0,267	0,187
G. Вплив на протяжність маршруту сполучення	G.1. Не впливає	0,128	0,020	0,002	0,001	0,010	0,014	0,125	0,021
	G.2. Частково мінімізує	0,266	0,101	0,075	0,059	0,077	0,096	0,252	0,098
	G.3. Помірно мінімізує	0,343	0,345	0,357	0,345	0,358	0,335	0,355	0,367
	G.4. Суттєво мінімізує	0,263	0,534	0,567	0,595	0,555	0,556	0,268	0,515
H. Вплив на фактор «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»	H.1. Не впливає	0,052	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,020	0,006
	H.2. Частково мінімізує	0,278	0,102	0,025	0,021	0,019	0,093	0,215	0,112
	H.3. Помірно мінімізує	0,234	0,219	0,209	0,204	0,193	0,225	0,234	0,214
	H.4. Суттєво мінімізує	0,436	0,673	0,766	0,775	0,788	0,675	0,530	0,668

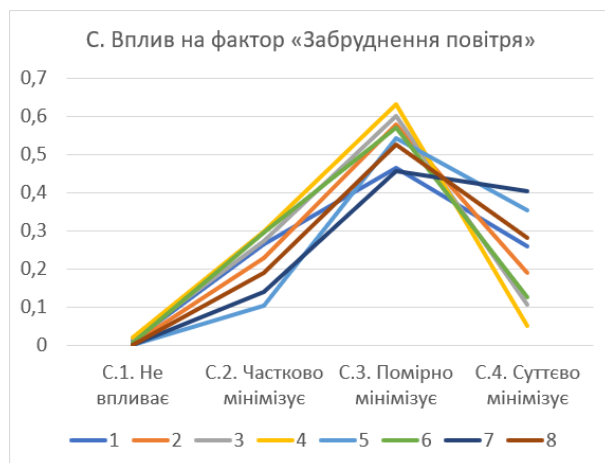


Рис. 2. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P1. Забруднення повітря»

Fig. 2. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P1. Air pollution»

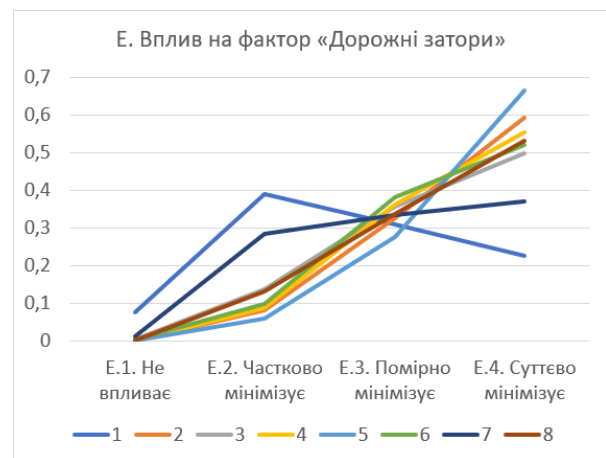


Рис. 3. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P3. Дорожні затори»

Fig. 3. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P3. Traffic jams»

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

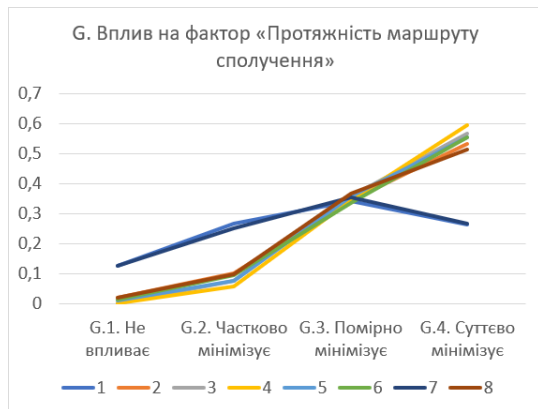


Рис. 4. Вплив автомобільних тунелів 1...8 на фактор ризику «P5. Протяжність маршруту сполучення»

Fig. 4. Impact of car tunnels 1...8 on the risk factor «P5. Length of the connection route»

Для більшої наочності порівняння впливу будівництва потенційних автомобільних тунелів на різні фактори ризику введемо коефіцієнт $w_{ratio} = (w_{medium} + w_{high}) / (w_{low} + w_{none})$, який відображає відношення суми оцінок альтернатив помірного w_{medium} і суттєвого w_{high} впливу будівництва автомобільного тунелю на мінімізацію відповідного фактору ризику, до суми ваг альтернатив часткового w_{low} і відсутнього w_{none} впливу будівництва автомобільного тунелю на мінімізацію того ж фактора ризику. Більші значення цього коефіцієнта свідчать про більш значний вплив потенційного будівництва автомобільного тунелю на відповідний фактор ризику. Розраховані коефіцієнти w_{ratio} для всіх восьми автомобільних тунелів наведені у вигляді діаграми на рис. 5.

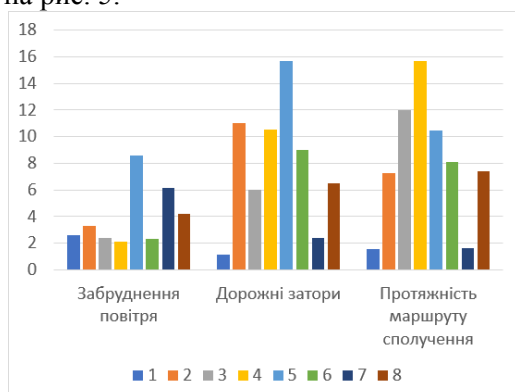


Рис. 5. Порівняння автомобільних тунелів 1...8 за зведеним показником впливу на фактори ризику

Fig. 5. Comparison of car tunnels 1...8 by the combined indicator of impact on risk factors

Як бачимо з рис. 2...5, автомобільний тунель 5 має значний вплив на фактори ризику, пов'язані з кліматичною нейтральністю. Цей автомобільний тунель має найвищий рейтинг зі значною перевагою за факторами забруднення повітря і дорожніх заторів, і знаходиться в трійці найважливіших тунелів за аспектом протяжності маршруту сполучення. На другій позиції за впливом на забруднення повітря знаходиться автомобільний тунель 7, який також має високе значення альтернативи суттєвого впливу на екологічний (кліматичний) аспект (рис. 1), однак за впливом на два інші розглянуті показники ризику цей автомобільний тунель має більш скромні показники, оскільки він фактично дублює існуючу транспортну артерію з високою пропускною здатністю. Таким чином, автомобільний тунель 5 може бути рекомендований для першочергового будівництва і доцільно дослідити його вплив на функціонування транспортної системи м. Києва та загального зменшення автомобільних викидів.

Результати оцінки впливів автомобільного тунелю з використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва. Тестування пріоритетного автомобільного тунелю 5 проведене із використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва та його приміської зони, розроблений в Навчальній науково-дослідній лабораторії просторового планування територій та моделювання транспортних потоків кафедри міського будівництва Київського національного університету будівництва та архітектури, яка, подібно до морфологічної моделі, є математичним інструментом для кількісної та якісної оцінки наслідків прийняття управлінських рішень при транспортному плануванні територій [4]. Транспортну модель можна представити у вигляді двох складових – моделі транспортної пропозиції (складається з елементів транспортної системи міста: вулично-дорожня мережа, маршрути громадського транспорту різних типів, зупинки тощо) та моделі транспортного попиту (характеризує цілі вибору режимів і маршрутів переміщень, параметри мобільності населення тощо).

Структура характеристик, які використовуються у транспортній моделі:

1. Просторово-планувальні характеристики: параметри морфологічної структури міста, зок-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

рема функціональне зонування території, конфігурація вулично-дорожньої мережі та класифікація вулиць; особливу увагу приділяють наявності транспортно-пересадкових вузлів і розподілу зон тяжіння поїздок у межах міста.

2. Елементи інженерно-транспортної інфраструктури: охоплюють технічні та експлуатаційні параметри мережі громадського транспорту (типи рухомого складу, маршрути, інтервали, швидкість руху тощо), індивідуального транспорту (інтенсивність, середня швидкість, обмеження руху тощо).

3. Соціально-економічні параметри: включають просторовий розподіл населення, щільність та структуру домогосподарств, рівень автомобілізації, розміщення місць прикладання праці, наявність навчальних та комерційних установ, які виступають як джерела або поглиначі транспортного попиту.

4. Поведінкові характеристики: транспортна модель враховує мотивацію поїздок (робочі, освітні, соціальні, побутові цілі), часові параметри (тривалість поїздок, затримки в русі), логіку вибору виду транспорту (з урахуванням затрат), а також маршрутні переваги користувачів.

У результаті транспортного моделювання можна отримати навантаження на різні елементи вулично-дорожньої мережі, матриці кореспонденцій для різних режимів переміщень, екологічну (кліматичну) оцінку досліджуваних територій, техніко-економічні обґрунтування розвитку інженерно-транспортної інфраструктури.

Для оцінки впливу автомобільного тунелю 5 розглядали два сценарії: сценарій 1 (базовий) – існуюча прогнозна транспортна модель міста Києва та його приміської зони [5], як основа для подальшого порівняння розрахункових сценаріїв; сценарій 2 – впровадження в існуючу модель автомобільного тунелю від Галицької площі до Броварського проспекту в районі ст. м Лівобережна з шириною проїзної частини у дві смуги руху в кожному напрямку (рис. 6).

Картограми транспортного моделювання відображені на рис. 7 та 8.

У результаті проведених розрахунків отримані показники якості функціонування вулично-дорожньої мережі по м. Києву за двома сценаріями (табл. 4).

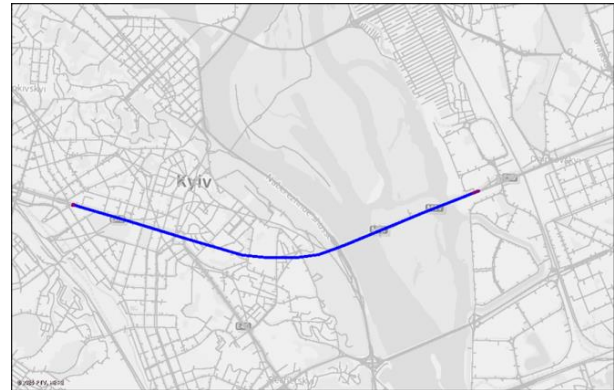
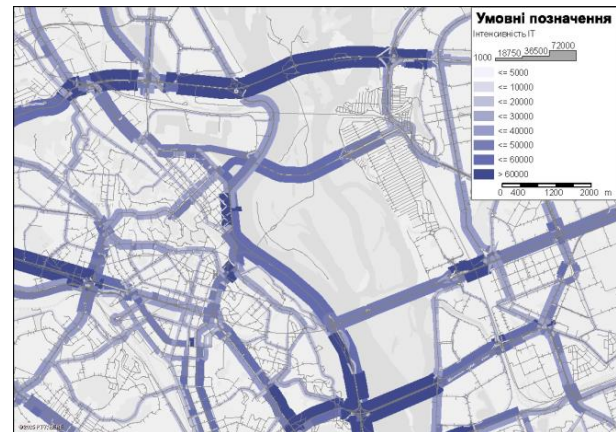


Рис. 6. Трасування проектного автомобільного тунелю 5 у розрахунковому сценарії 2

Fig. 6. Route of the design car tunnel 5 in calculation scenario 2

a – a



б – б

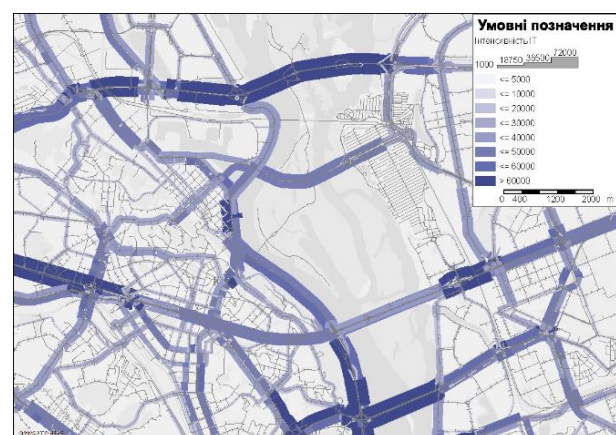
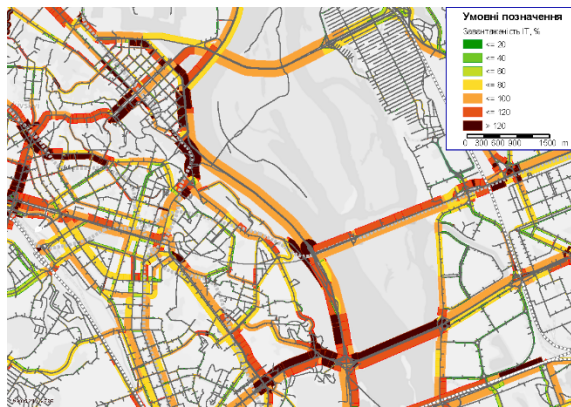


Рис. 7. Картограми інтенсивності руху транспорту: *a* – сценарій 1; *б* – сценарій 2

Fig. 7. Traffic intensity maps: *a* – scenario 1; *b* – scenario 2

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

а – а



ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

розвитку підземної інфраструктури. Вперше з використанням прогнозної транспортної моделі м. Києва поставлена дослідна задача й отримані кількісні показники зміни трафіку від включення автомобільного тунелю в транспортну мережу міста, зокрема – вплив визначеної траси тунелю на зменшення емісії CO₂.

Розроблена комплексна модель та методика сценарного аналізу забезпечують міське самоврядування, державні органи влади, зацікавлені громадські організації та інвесторів ефективними можливостями для прийняття планувальних рішень, виходячи із системних позицій і суспільної ваги факторів ризику.

Висновки

Широке освоєння міського підземного простору крім вирішення транспортних, територіальних, гідротехнічних, енергетичних і безпечних проблем великого міста може розглядатися як ефективний інструмент сприяння кліматичній нейтральності (зменшенню викидів парникових газів). При цьому задачі покращення міського трафіку корелюють із задачами мінімізації викидів CO₂.

Використання комплексної моделі модифікованого методу морфологічного аналізу для оцінки системи автомобільних тунелів дало можливість оцінити пріоритетність (першочерговість) будівництва автомобільних тунелів, які розглядалися при розробці Генерального плану м. Києва [15], з урахуванням кліматичних (екологічних) ризиків. Найбільший рейтинг отримав тунель 5 (від Галицької площі до початку Броварського проспекту).

Оцінка впливу даного автомобільного тунелю на міський трафік проводилась з використанням прогнозної транспортної моделі м. Киє-

ва – перевіреного експертного інструменту для підтримки прийняття рішень в області управління транспортною інфраструктурою. Результати транспортного моделювання показують, що введення в експлуатацію зазначеного автомобільного тунелю зменшують за добу загальний пробіг індивідуального транспорту в межах міста на 149,5 тис. км, а загальний час реалізації транспортних кореспонденцій – на 99,2 тис. годин, що сумарно зменшує викиди всього автомобільного руху містом приблизно на 4%. Хоча проведене рейтингування восьми автомобільних тунелів свідчить про дещо менший вплив інших трас на трафік і викиди CO₂, цей вплив усе ж таки залишається вагомим. Можна припустити, що розглянута в Генеральному плані система з восьми автомобільних тунелів у разі введення в експлуатацію тільки за рахунок вдосконалення міського трафіку могла б зменшити обсяги викидів CO₂ на 18...20 %, а з урахуванням можливої відведення та утилізації автомобільних викидів у автомобільних тунелях – на 25...27 %, без врахування фактору спровокованого попиту. Таким чином, у роботі на прикладі м. Києва вперше доведений високий вплив автомобільних тунелів на зменшення викидів парникових газів, що дає підстави розглядати підземну транспортну інфраструктуру як вагому складову кліматичної нейтральності великих міст.

Грантова підтримка

Дослідження виконане в рамках рамкової програми Horizon Europe, проєкт «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», грантова угода: 101148374, і профінансоване Європейським Союзом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гайко Г. І., Булгаков В. П., Сіверин М. О. Система автомобільних тунелів як спосіб розв'язання транспортних і екологічних проблем мегаполісу. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2016. № 30. С. 196–206.
2. Гетун Г., Безклубенко І., Соломін А., Баліна О. Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2023. № 67. С. 203–220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220>
3. Клименко М. О., Пилипенко Ю. В., Мороз О. С. *Екологія міських систем*. Київ : ВД «Кондор», 2024. 294 с.

4. Осетрін М. М., Беспалов Д. О., Дорош М. І. Основні принципи створення транспортної моделі міста. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. № 57. С. 309–320.
URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7449>
5. Bespalov D., Tarasiuk V., Osetrin M., Dorosh M., Pryimachenko O. An analysis of the transport impact of finish building on-ramps and off-ramps from the Dnipro embankment to the Darnytskyi Bridge in Kyiv. *Architectural Studies*. 2024. Vol. 10. Iss. 2. P. 172–190. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.172>
6. Duczynski G. Investigating traffic congestion: Targeting technological and social interdependencies through general morphological analysis. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. P. 161–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.019>
7. CO₂ emissions performance of new passenger cars in Europe. *European Environment Agency*. 2024.
URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger>
8. Genger T. K., Luo Y., Hammad A. Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 115. 104073.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104073>
9. Glazebrook G., Newman P. The City of the Future. *Urban Planning*. 2018. Vol 3. № 2. P. 1–20.
DOI: <https://doi.org/10.17645/up.v3i2.1247>
10. Hickman R., Banister D. *Transport, Climate Change and the City*. London : Taylor Francis Group, 2024. 400 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203074435>
11. Mortati M., Cartron E. Strategizing for Climate Neutrality. How to Make Social Innovation Relevant in the City's Journey to Climate Neutrality. *Social Innovation Projects for Climate Neutral Cities* : SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology / ed. by S. Bresciani. Cham : Springer. 2025. P. 25–52.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87726-1_3
12. Pankratova N., Haiko H., Savchenko I. *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Cham : Springer, 2024. 256 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Raoofi Z., Stenemo E., Engholm A., Pernestål A. How can we structure the future development of automation, electrification, and digitalization in the transportation sector by using morphological analysis? *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1808–1815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.657>
14. Śmieszek M., Kostian N., Mateichyk V., Mościszewski J., Tarandushka L. Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 24. 8538.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248538>
15. Vodianyi A. Проект Генплану Києва. *Slideshare*. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/ss-230454864/230454864>

H. I. HAIKO^{1*}, I. O. SAVCHENKO², V. P. TARASIUK³, D. O. BESPALOV⁴

^{1*}Dep. of Geoengineering Chair, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteysky Av., 37, Block 22, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (050) 921 94 59, e-mail gayko.kpi@meta.ua, ORCID 0000-0001-7471-3431

²Dep. of Mathematical Methods for System Analysis Chair, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteysky Av., 37, Block 22, Kyiv, Ukraine, 03056, tel. +38 (050) 387 16 88, e-mail savil.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0921-5425

³Dep. of Urban Planning, Kyiv National University of Construction and Architecture, Air Force Av., 31, Kyiv, Ukraine, 03037, tel. +38 (097) 396 93 24, e-mail tarasyuk90@gmail.com, ORCID 0000-0003-4762-5668

⁴Dep. of Urban Planning, Kyiv National University of Construction and Architecture, Air Force Av., 31, Kyiv, Ukraine, 03037, tel. +38 (067) 943 51 19, e-mail dmitry.bespalov@me.com, ORCID 0000-0002-0778-5627

Car Tunnels as a Climate Neutrality Factor for a Large City

Purpose. Determining the development priorities for a network of car tunnels envisioned in the Kyiv city General Plan, considering the city's climate neutrality problem; systemic evaluation of a car tunnel's impact on the city's functioning, traffic change, and ecological (climate) indicators. **Methodology.** Modified morphological analysis method for urbanized territories, considering the groups of structural and functional, and ecological (climate) factors and risks, including: air pollution (car exhaust fumes), route length, traffic jams, dynamic noise etc. The transport model for Kyiv was introduced as a combination of two components – the transport supply model (consisting of the city's traffic system elements: road network, different public transport routes, stations etc.), and the

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

transport demand model (which characterizes the purposes for the choice of modes and routes for movement, population mobility parameters etc.). The synthesis of these methodologies is considered by the authors as an important process of converting scientific methods into management decisions. **Findings.** A systemic decision support model was developed for evaluating priorities, and ranking (advisable queueing) of tunnel construction in Kyiv considering the climate neutrality factor; a comparative assessment was made, and the highest-ranking tunnel was determined (the track from Galytska square to the start of the Brovarskyi avenue). Testing the scenario that incorporates said tunnel into the transport model of Kyiv allowed to assess the overall expected traffic change, and demonstrated the capacity to reduce overall CO₂ exhaust by 4 % of the total city's emission. **Originality.** The novel construction of a morphological model for evaluating a system of car tunnels considering their impact on key risk factors that allowed to assess alternative configurations (scenarios) taking into account different priorities (weights) of a certain risk, particularly those impacting CO₂ emission; a quantitative correlation was revealed between the tunnel's track, its impact on the city traffic, and reduction of CO₂ exhaust. **Practical value.** The paper demonstrates the high impact of car tunnels on the reduction of greenhouse gas emission (as well as mitigating a number of transport, territorial and safety issues) on the example of Kyiv city, providing the basis of considering the development of the underground traffic infrastructure as a constituent of achieving climate neutrality and sustainable development in big cities. **Grant support.** The research was conducted within the Horizon Europe frame program, project «Ukraine towards Carbon Neutrality (U_CAN)», grant agreement 101148374, and financed by the European Union.

Keywords: city planning; underground construction; climate neutrality; CO₂ emission; car tunnels; city traffic; system analysis; transport model

REFERENCES

1. Haiko, H. I., Bulhakov, V. P., & Siveryn, M. O. (2016). Systema avtomobilnykh tuneliv iak sposib rozv'iazannia transportnykh i ekolohichnykh problem mehapolisu. *Visnyk NTUU «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Hirnyctvo»*, 30, 196-206. (in Ukrainian)
2. Getun, G., Bezklubenko, I., Solomin, A., & Balina, O. (2023). Features of volume-planning decisions of civil defense protective structures. *Current Problems of Architecture and Urban Planning*, 67, 203-220. DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.67.203-220> (in Ukrainian)
3. Klymenko, M. O., Pylypenko, Yu. V., & Moroz, O. S. (2024). *Ekolohiia miskykh system*. Kyiv: VD «Kondor». (in Ukrainian)
4. Osetrin, M. M., Bespalov, D. O., & Dorosh, M. I. (2015). Osnovni pryntsypy stvorennia transportnoi modeli mista. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*, 57, 309-320. Retrieved from: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/7449> (in Ukrainian)
5. Bespalov, D., Tarasiuk, V., Osetrin, M., Dorosh, M., & Prymachenko, O. (2024). An analysis of the transport impact of finish building on-ramps and off-ramps from the Dnipro embankment to the Darnytskyi Bridge in Kyiv. *Architectural Studies*, 10(2), 172-190. DOI: <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.172> (in English)
6. Duczynski, G. (2018). Investigating traffic congestion: Targeting technological and social interdependencies through general morphological analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 161-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.019> (in English)
7. CO₂ emissions performance of new passenger cars in Europe. (2024). *European Environment Agency*. Retrieved from: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-of-new-passenger> (in English)
8. Genger T. K., Luo Y., & Hammad, A. (2021). Multi-criteria spatial analysis for location selection of multi-purpose utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 115, 104073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104073> (in English)
9. Glazebrook, G., & Newman, P. (2018). The City of the Future. *Urban Planning*, 3(2), 1-20. DOI: <https://doi.org/10.17645/up.v3i2.1247> (in English)
10. Hickman, R., & Banister, D. (2024). *Transport, Climate Change and the City*. London: Taylor Francis Group. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203074435> (in English)
11. Mortati, M., & Cartron, E. (2025). Strategizing for Climate Neutrality. How to Make Social Innovation Relevant in the City's Journey to Climate Neutrality. *Social Innovation Projects for Climate Neutral Cities* : SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-87726-1_3 (in English)

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

12. Pankratova, N., Haiko, H., & Savchenko, I. (2024). *Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach*. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1> (in English)
13. Raoofi, Z., Stenemo, E., Engholm, A., & Pernestål, A. (2023). How can we structure the future development of automation, electrification, and digitalization in the transportation sector by using morphological analysis? *Transportation Research Procedia*, 72, 1808-1815. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.657> (in English)
14. Śmieszek, M., Kostian, N., Mateichyk, V., Mościszewski, J., & Tarandushka, L. (2021). Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*, 14(24), 8538. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14248538> (in English)
15. Vodiani, A. (2020). *Heneralnyi plan mista Kyieva*. Slideshare. Kyiv. Retrieved from: <https://www.slideshare.net/andrewvodiani/ss-230454864> (in Ukrainian)

Надійшла до редколегії: 15.07.2025

Прийнята до друку: 18.12.2025