

УДК 662.997:621.176]:625.42(477.54-25)

аспірант **Вадим Задіранов**,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.122-139>

МОДЕЛЮВАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА ТА ТЕПЛОВОГО НАСОСА В УМОВАХ ХАРКОВА

***Анотація.** У рамках національної стратегії енергетичної стійкості України та міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів декарбонізація теплопостачання стає пріоритетом державної енергетичної політики. Як підписант Паризької угоди, Україна зобов'язалася скоротити викиди CO₂ та збільшити частку відновлюваних джерел енергії. Одним із найперспективніших напрямків підвищення енергоефективності в міському середовищі є утилізація відпрацьованого тепла, що утворюється в інфраструктурі метрополітену. Підземні транспортні системи, зокрема тунелі та станції метро, накопичують значну кількість теплоти внаслідок роботи гальмівних систем поїздів, вентиляції, інженерного обладнання та пасажиропотоку. У закордонних дослідженнях використовувалися різні підходи до його вилучення: встановлення теплообмінника у вентиляційних шахтах метро; прикріплення абсорбційних труб до геотекстилю між облицюванням метро; вбудовування абсорбційних труб у сегмент тунелю; встановлення теплообмінників поблизу тунелю. Такі рішення були успішно реалізовані в таких містах, як Лондон, Париж, Барселона та Токіо. В Україні було проведено кілька досліджень з використання низькопотенційної теплоти з вентиляційних викидів метро. Однак вони обмежувалися аналізом теплообміну між вентиляційними викидами та системою теплового насоса. Водночас потенціал використання накопиченої теплоти в навколишньому ґрунті поблизу тунелів метро, які експлуатуються протягом десятиліть і утворюють стабільне температурне поле в масиві, в Україні залишається невивченим. Тема підвищення продуктивності геотермальних теплових насосів за допомогою теплоти, що виділяється з витяжної вентиляції метро, досі не досліджувалася в Україні. Тому ця стаття присвячена саме цьому дослідженню.*

Ключові слова: метрополітен, вертикальний ґрунтовий теплообмінник, утилізація теплоти

Вступ. У рамках національної стратегії енергетичної стійкості України та взяття на себе міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів, декарбонізація системи тепlopостачання стає пріоритетом державної енергетичної політики. Україна як учасниця Паризької угоди взяла на себе зобов'язання щодо зниження викидів CO₂ та збільшення частки відновлюваних джерел енергії. Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності в міському середовищі є утилізація відпрацьованої теплоти, що генерується в інфраструктурі метрополітену. Підземні транспортні системи, зокрема тунелі та станції метро, акумулюють значну кількість теплоти за рахунок гальмівних систем поїздів, вентиляції, інженерного обладнання та пасажиропотоку [1]. У закордонних дослідженнях застосовувалися різні підходи до його вилучення:

- установа теплообмінника у вентиляційних шахтах метрополітену;
- кріплення абсорбційних труб до геотекстилю між обшивкою метрополітену;
- вбудування абсорбційних труб у сегмент тунелю;
- установа теплообмінників поблизу тунелю.

Такі рішення успішно реалізовані в таких містах, як Лондон [2], Париж [3], Барселона [4] і Токіо [5]. Проводилися окремі дослідження, присвячені утилізації низькопотенційної теплоти вентиляційних викидів метрополітену і в Україні [6]. Але вони обмежувались аналізом теплообміну між вентиляційними викидами та системою теплового насоса. При цьому залишається нерозкритим потенціал використання накопиченої теплоти в навколишньому ґрунті поблизу перегінних тунелів метрополітену, що працюють протягом десятиліть і формують стійке температурне поле в масиві. Тема підвищення продуктивності геотермальних теплових насосів за допомогою відпрацьованої теплоти метрополітену до теперішнього часу в Україні не досліджувалася. Тому дана стаття присвячена саме цьому дослідженню.

Актуальність дослідження визначається зростанням попиту на екологічні та енергоефективні рішення для опалення міст. Одним із таких перспективних напрямків є використання накопиченої теплоти метрополітену, яке до цього часу залишається недостатньо вивченим. Встановлення факту та оцінювання ступеня впливу метрополітену на вертикальні ґрунтові теплообмінники відкриває можливості для подальших досліджень і залучення цього джерела теплоти у сучасні міські енергетичні системи.

Формулювання цілей статті. Дослідження теплового впливу тунелю метрополітену на роботу розташованого поблизу вертикального ґрунтового теплообмінника.

Попереднє моделювання. Для досягнення цілей дослідження за допомогою програмного пакету COMSOL Multiphysics 2023 була побудована попередня 2D-модель, що залежить від часу. Чисельне моделювання проводилося методом скінченних елементів. Для побудови моделі як приклад була обрана станція метро «Вокзальна» в місті Харків, а також перегінний тунель між станціями «Вокзальна» та «Центральний ринок». На першому етапі створено модель для визначення річного розподілу температури в ґрунті без урахування впливу тунелю метро та теплообмінника. Це дозволило встановити базовий температурний профіль, що враховує сезонні коливання й геотермальний градієнт. При подальшому чисельному моделюванні використання однорідного температурного профілю є недоцільним, оскільки важливо враховувати початковий ефект від прогрівання ґрунту метрополітенем. Це пов'язано з тим, що тривала експлуатація підземної залізниці істотно підвищує температуру навколишнього ґрунту ще до встановлення теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником. Станція метро «Вокзальна» була введена в експлуатацію в 1975 році, тому було розглянуто 50-річний період експлуатації метрополітену без використання теплового насоса. Це дозволило визначити вплив тепловиділення від метрополітену на температурне поле навколишнього ґрунту з часом.

Після цього з використанням отриманого температурного профілю ґрунту, моделювалась установка та робота вертикальних ґрунтових теплообмінників. Такий підхід забезпечив більш точне уявлення про взаємодію між вже прогрітим ґрунтом і новою встановленою системою з тепловим насосом, що особливо важливо для міських умов, де підземна інфраструктура функціонує тривалий час до впровадження нових технологій.

Процес розподілу теплоти залежно від часу для всієї області ґрунту даної моделі був змодельований з використанням рівняння теплопровідності Фур'є-Кірхгофа без виділення в системі теплоти з внутрішніх джерел, Вт/м³:

$$\rho \cdot C_p \cdot \partial T / \partial t = k \cdot \nabla^2 T. \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³; C_p – питома теплоємність при сталому тиску, Дж/(кг·К); T – температура, °С; t – час, с; k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ – оператор Лапласа; x, y – декартові координати, м.

Геометрія моделі. На рис. 1 показана задана область моделювання таким чином, щоб розміри ґрунту були значно більшими за розміри тунелю метрополітену та вертикального ґрунтового теплообмінника.

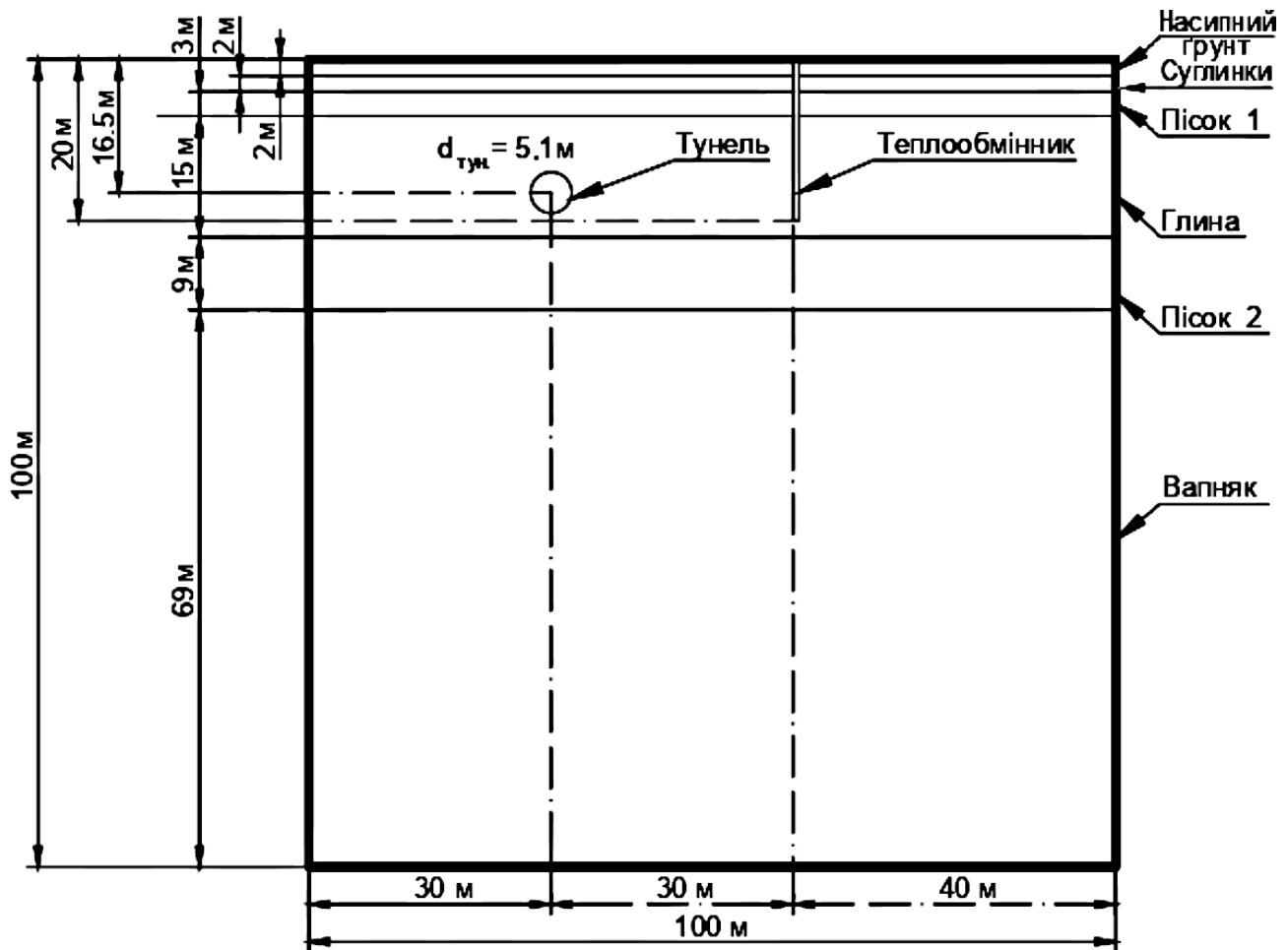


Рис.1. Геометричні умови 2D моделі

З метою мінімізації ефектів, що вносяться граничними умовами, область для моделювання була прийнята більшою, ніж розміри теплообмінника і тунелю. На підставі роботи авторів [7], які досліджували вплив різних факторів на дальність теплопередачі від стіни тунелю в ґрунт, можна зробити висновок, що приблизно у 20 м від тунелю тепловий ефект буде мінімальним.

У дослідницькому проекті ASHRAE 1119-RP [8] передбачалося, що температура ґрунту на відстані 10 м від центру теплообмінника залишається постійною. Також у дослідженні, проведеному в Університеті Віконсіна [9], при чисельному моделюванні теплопереносу для геотермальних систем межі модельованої області були встановлені на відстані 10 м від центру свердловини, щоб уникнути впливу граничних умов на результати.

Виходячи з цих даних можна зробити висновок, що область навколо вертикального теплообмінника в радіусі 10 м можна вважати достатньою для чисельного моделювання теплового поля. Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019 [10] для тунелів горизонтальна відстань, що дозволяє встановити вертикальні ґрунтові теплообмінники, становить не менше 5 м.

Розрахункова область складається з декількох шарів ґрунту на глибині до

100 м в районі станції м. «Вокзальна». Дані про шари ґрунту, товщину та теплофізичні властивості, наведені в таблиці 1, були взяті з [11], [12], [13], [14].

Таблиця 1.

Товщина та теплофізичні характеристики ґрунтів

Найменування ґрунтів	Товщина, м	Густина ρ , кг/м ³	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Питома теплоємність C , Дж/(кг·К)
Насипний ґрунт	2	2100	1,05	1680
Суглинки	2	2050	2,52	1926
Піски_1	3	1960	2,45	1256
Глина	15	1770	1,54	1340
Піски_2	9	2060	2,65	1382
Вапняк	69	1600	0,58	880

Моделювати реальну геометрію U-трубок в 2D осесиметрії неможливо без втрати фізичної достовірності (дві трубки не можна зобразити вздовж однієї осі). У німецькому стандарті VDI 4640 [15] вказується, що для систем потужністю понад 30 кВт рекомендується використовувати чисельне моделювання з урахуванням ефективного діаметра свердловини. Тому в даному дослідженні був використаний еквівалентний осесиметричний теплообмінник з діаметром свердловини 300 мм. Такий діаметр часто зустрічався в попередніх наукових роботах, зокрема в дослідженнях [16], [17], [18], [19], де розглядалися аналогічні задачі теплової взаємодії між ідентичним ґрунтом і вертикальним ґрунтовим теплообмінником. Обраний діаметр забезпечує достатню точність обчислень і водночас дозволяє уникнути крайніх значень температури, які можуть з'являтися при моделюванні з меншими розмірами.

Граничні умови. *Ґрунт.* У даній моделі теплопередача в ґрунт відбувається в нестационарному режимі, оскільки температурне поле ґрунту змінюється в часі. Для сезонних коливань температури поверхні ґрунту була застосована спрощена гранична умова першого роду, яка задає температуру поверхні як гармонійну функцію з річним періодом (2):

$$T_{нов.гр}(t) = T_{сер.нов.} + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot t\right), \quad (2)$$

де $T_{нов.гр}(t)$ – температура ґрунту, °С, в момент часу t , с; $T_{сер.нов.}$ – середня

температура повітря, °C; A – амплітуда річних коливань температури, °C; τ – період коливань, що дорівнює одному року (31 536 000 секунд).

Згідно з кліматичною характеристикою температури зовнішнього повітря в місті Харків середньомісячна температура (рис. 2) повітря коливається від мінус 5,9 °C до 20,7 °C, а середньорічна температура становить 7,6 °C

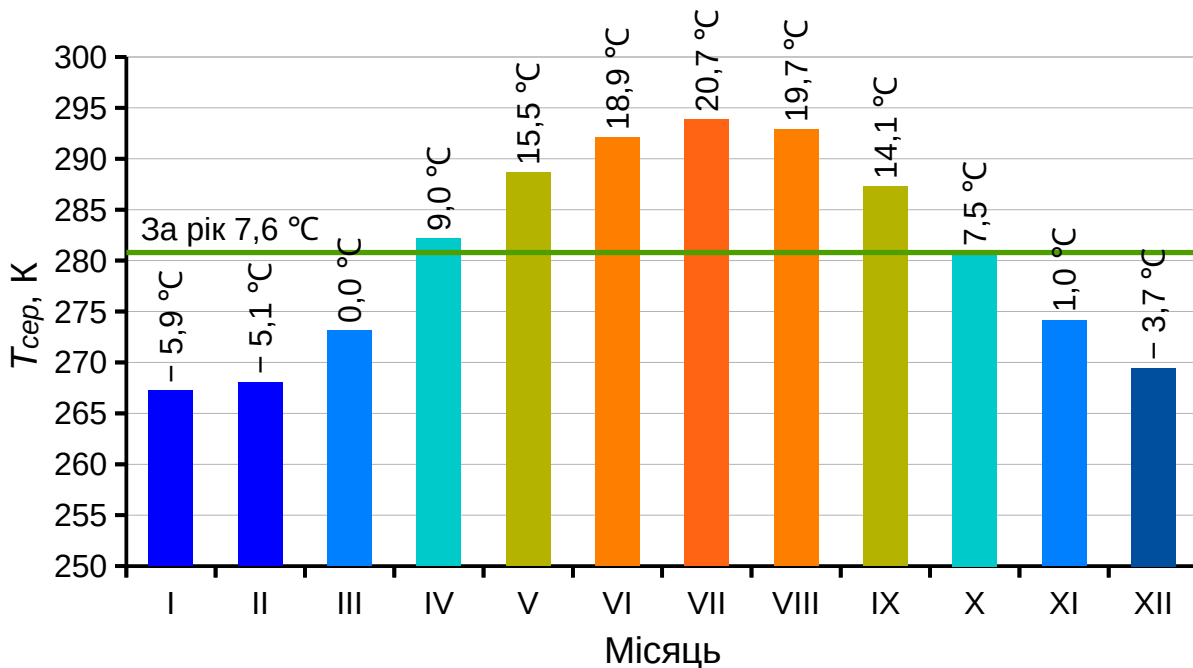


Рис.2. Середня температура за кожен місяць і за рік

Бічні межі заданої області вважаються адіабатичними, тому застосовані граничні умови 2-го роду (3):

$$q = -k \cdot \nabla T = 0 \quad (3)$$

де q – густина теплового потоку, що проходить через одиницю довжини, Вт/м²; ∇T – градієнт температури, °C/м.

Початкова умова є розподіл температури в профілі ґрунту в початковий момент часу, що з урахуванням середнього геотермального градієнта у м. Харкові 0,025 °C/м [21] задається відповідно до рівняння, °C,

$$T_{\text{поч.гр.}} = T_{\text{сер.пов.}} - 0,025 \cdot h \quad (3)$$

де $T_{\text{поч.гр.}}$ – початкова температура ґрунту на глибині h , °C; $T_{\text{сер.пов.}}$ – середня температура повітря на поверхні, °C; h – глибина, м.

Вертикальний ґрунтовий теплообмінник. При побудові моделі вертикального ґрунтового теплообмінника рух теплоносія всередині трубки теплообмінника не враховано. Це дозволяє зменшити розмірність задачі і скорочує обсяг розрахунків. Замість моделювання складних процесів руху теплоносія та розподілу температури всередині труб теплообмінника вводиться гранична умова на поверхні свердловини, яка задає періодичну залежність теплового навантаження. Використання періодичної межі теплового навантаження відображає циклічний синусоїдальний характер теплового навантаження системи. Підхід, заснований на періодичному тепловому навантаженні, застосовувався в дослідженнях – при розробці моделей G-функцій [22], – а також в роботі [23] – для вивчення довгострокової роботи полів теплообмінників з урахуванням руху ґрунтових вод. Ці підходи допомагають урахувати сезонні зміни в роботі теплообмінників.

Теплове навантаження системи теплового насоса, що працює в режимах опалення та охолодження з періодом коливання, який становить 1 рік, задається рівнянням:

$$Q_{cm, BGT} = A_Q \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau} \cdot t\right), \quad (5)$$

де $Q_{cm, BGT}$ – теплове навантаження на стінку теплообмінника, Вт/м; A_Q – амплітуда теплового навантаження (максимальна потужність), Вт/м.

Максимальне теплове навантаження на одиницю довжини теплообмінника прийнято рівним 20 Вт/м. Дана величина відповідає нормам відбирання теплової енергії вертикальними ґрунтовими теплообмінниками згідно з ДСТУ Б В.2.5-44:2010 [24].

Залежне від часу періодичне теплове навантаження накладається на поверхню стінки теплообмінника і вводиться як гранична умова для розрахунку теплового потоку на одиницю довжини теплообмінника:

$$q_{cm, BGT} = \frac{Q_{cm, BGT}}{2 \cdot \pi \cdot r_{BGT}}, \quad (6)$$

де $q_{cm, BGT}$ – теплове навантаження через одиницю площі вертикального ґрунтового теплообмінника (ВГТ), Вт/м²; $r_{cm, BGT}$ – радіус стінки ВГТ, м.

Припущення про рівномірний розподіл теплового потоку вздовж кола стінки теплообмінника є наближенням, але виправданим за умови достатньої

теплопровідності матеріалів і невеликого опору теплопередачі теплообмінника.

Тунель метрополітену. У даному попередньому двовимірному дослідженні ґрунт піддається впливу циліндричної порожнини, яка моделює тунель (на рис. 1 позначена як «Тунель». При цьому не враховувались особливості тунелю, як-от матеріал і товщина стінок, характеристики повітряного потоку (швидкість, відносна вологість) тощо. Замість цього всередині порожнини була застосована спрощена температурна межа безпосередньо до внутрішньої поверхні порожнини, у якій температурне поле тунелю замінено на фіксовану граничну температуру стінок, апроксимовану емпіричними залежностями.

Рівняння залежності температури платформи $T_{\text{лат}}$, °С, від температури зовнішнього повітря можна записати у вигляді лінійної функції

$$T_{\text{лат}} = a T_{\text{сер.пов.}} + b, \quad (7)$$

де a – коефіцієнт, що характеризує ступінь теплового зв'язку тунелю з поверхнею; b – вільний член, що характеризує базовий рівень температури на платформі за відсутності відхилень зовнішньої температури від середньорічного значення та відображає сумарний ефект внутрішніх джерел теплоти (поїзди, пасажери, освітлення та обладнання) і теплоаккумуляційну здатність навколишнього ґрунту та конструкцій, °С. Ці емпіричні коефіцієнти отримано на основі статистичного аналізу. Лінійна залежність температури (7) підтверджується експериментальними даними. Проведено чисельне оброблення даних температури, виміряних у різні дні протягом 2024 року, для встановлення зв'язку між температурою зовнішнього повітря та температурою повітря на платформі станції. Інформацію про середньодобові температури на поверхні було взято згідно з даними Харківського регіонального центру з гідрометеорології [25]. Після оброблення даних методом найменших квадратів було отримано формулу:

$$T_{\text{лат}} = 0,4745 T_{\text{сер.пов.}} + 16,72, \quad (8)$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9292$ свідчить про високий ступінь узгодженості моделі з фактичними спостереженнями. Щоб уникнути введення додаткового параметра в модель, у даному дослідженні було прийнято припущення, що температура зовнішнього повітря близька до температури поверхні ґрунту $T_{\text{пов.гр.}}$ з рівняння (2). З урахуванням формули (8),

$$T_{\text{лат}} = 0,4745 T_{\text{пов.гр.}} + 16,72, \quad (9)$$

Для моделювання температури всередині тунелю $T_{\text{тун}}$, °C було прийнято припущення, що вона в середньому на 2 °C нижча за температуру на платформі [11]. Це пояснюється концентрацією теплоти, що виділяється гальмівними системами та двигунами поїздів, у районі платформ. Таким чином, гранична умова на стінці тунелю записувалася з урахуванням рівняння (9) таким чином

$$T_{\text{тун}} = 0,4745 T_{\text{пов.гр.}} + 14,72. \quad (10)$$

Результати та валідація. Грунт. У даному дослідженні було проведено вивчення температурного режиму ґрунту та побудовано розрахункову модель, що залежить від часу. На рис. 3 представлено графік розподілу температури за глибиною, отриманий у результаті 2D моделювання.

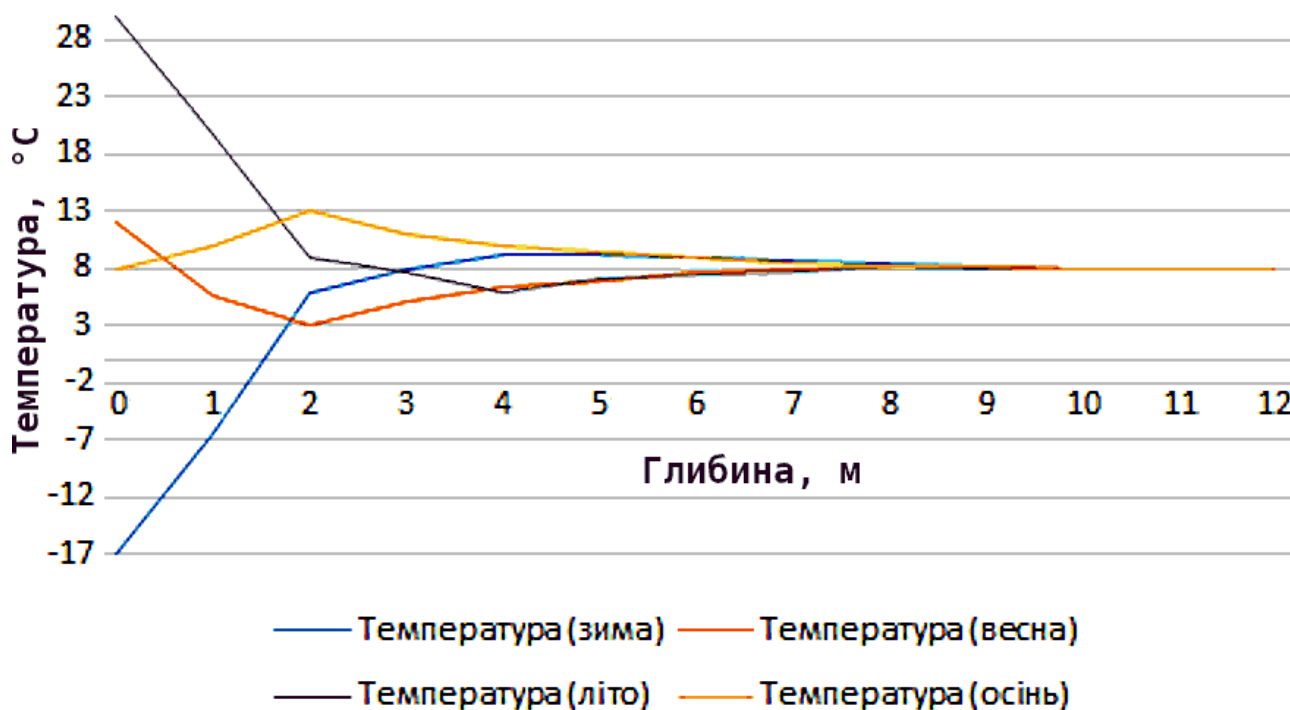


Рис. 3. Змодельований річний розподіл температури ґрунту

Дана модель дозволила визначити температурний режим ґрунту в Харкові. Рис. 3 показав, що амплітуда коливань температури зменшується із збільшенням глибини. Коливання температури повітря на поверхні впливають на ґрунт до глибини близько 9 м. При цьому на глибині 9 м і нижче температурні коливання зникають, а температура стабілізується на рівні 8,8 °C.

Для підтвердження коректності отриманих результатів було проведено їхню валідацію з використанням даних з монографії [26]. Вона показала різницю в 0,2 °C між результатами моделювання й літературними даними, що є прийнятним і свідчить про достовірність проведених розрахунків.

Моделювання температури в тунелі та на поверхні землі. Для моделювання сезонної динаміки температури в межах розрахункової області було обрано часовий проміжок тривалістю 6 років, що дозволяє охопити кілька повних річних коливань. Також побудовано гармонійні функції часу (рис.4).

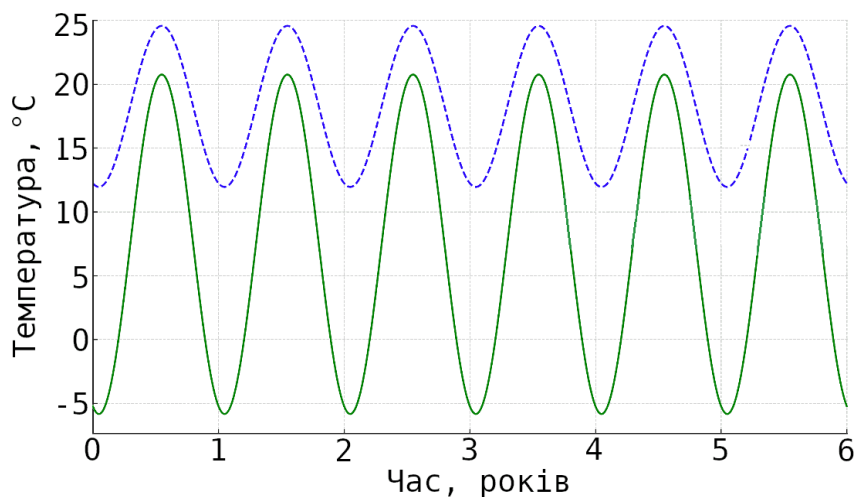


Рис. 4. Гармонічна модель сезонної температури на поверхні ґрунту та в тунелі метрополітену:

Температуру в тунелі метрополітену представлено у вигляді лінійної функції від температури на поверхні, що враховує згладжений характер температурних коливань у підземному просторі та наявність внутрішніх джерел теплоти. Отримана функція забезпечує середньорічне значення температури в тунелі біля 18,3 °C, яка є істотно вищою за температуру ґрунту на глибині залягання. Амплітуда сезонних коливань становить близько 6,3 °C, що створює більш стабільне джерело теплоти порівняно з поверхнею. Проведене чисельне моделювання підтверджує, що отримана температура в тунелі знаходиться в межах 13-25 °C, що відповідає нормативним вимогам ДБН В.2.3-7-2010 [27].

Теплопередача в ґрунт від стіни тунелю. Для задавання реалістичного температурного фону та врахування теплового накопичення, викликаного тривалим впливом теплового навантаження від метрополітену, застосовано нестационарну модель попереднього прогрівання ґрунту протягом 50 років.

Результати, отримані за допомогою моделювання процесу теплопровідності від стіни тунелю в ґрунт, перевірені аналітичним розв'язанням диференціального рівняння для стаціонарного процесу теплопровідності.

Стаціонарне рівняння теплопровідності в циліндричній системі координат з радіус-вектором r , м, без джерел теплоти при радіальній симетрії має вигляд:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \cdot k \cdot \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (11)$$

Розв'язком даного рівняння за граничних умов $T(r_1) = T_1, ^\circ\text{C}$; $T(r_2) = T_2, ^\circ\text{C}$, є така залежність (рис. 5), $^\circ\text{C}$:

$$T(r) = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \quad (12)$$

де r_1 – радіус тунелю метрополітену, м; r_2 – відстань від центру тунелю до зовнішньої умовно непорушеної межі модельованої області в радіальному напрямку, м; T_1 – температура на внутрішній стінці тунелю, $^\circ\text{C}$; T_2 – температура непорушеного ґрунту, куди теплота від тунелю практично не доходить, $^\circ\text{C}$.

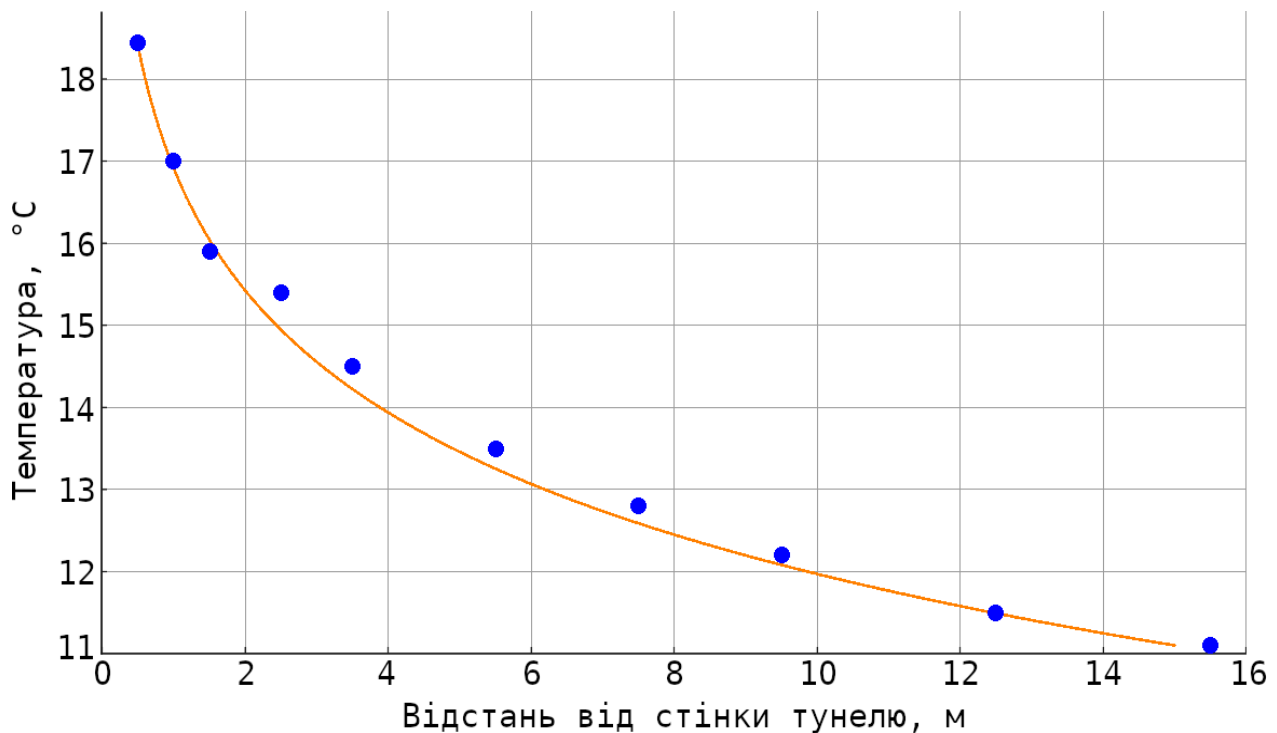


Рис. 5. Розподіл температури вздовж радіуса в ґрунті від поверхні тунелю:
 ● – чисельне моделювання; — аналітичний розрахунок

Середня абсолютна розбіжність між даними чисельного моделювання та аналітичного розрахунку становить $0,17 ^\circ\text{C}$, що свідчить про високу точність чисельного рішення і його відповідність аналітичній моделі.

Вертикальний ґрунтовий теплообмінник. З метою перевірення коректності

побудови чисельної моделі вертикального ґрунтового теплообмінника було проведено валідацію за умови симетрії температурного поля. За умови симетричної геометрії моделі, однорідності фізичних властивостей ґрунту та симетричних граничних умов, розподіл температур повинен бути симетричним відносно вертикальної осі теплообмінника. Для цього були обрані дві контрольні точки на однаковій глибині (16,5 м) і на однаковій відстані (3 м) ліворуч і праворуч від центра теплообмінника. Значення температури в цих точках порівнювалися протягом усього періоду моделювання. Максимальні відхилення, значно менші ніж $0,1^{\circ}\text{C}$ (таблиця 3), підтверджують симетрію температурного поля, що свідчить про правильність реалізації геометрії, граничних умов і якості сітки в даній області.

Таблиця 3.

Результати валідації чисельної моделі за умови симетрії температурного поля

День моделювання	Температура, $^{\circ}\text{C}$, у точці на відстані 3 м в напрямку від центру теплообмінника	
	ліворуч	праворуч
1000	10,131	10,131
1500	6,521	6,523
2000	10,256	10,257
2500	8,192	8,190
3000	6,963	6,962

Остаточне дослідження. Дане дослідження спрямоване на оцінювання впливу теплового випромінювання від тунелю метрополітену на ефективність роботи вертикального ґрунтового теплообмінника. Для цього було змодельовано два сценарії: у першому розглядався теплообмінник, який протягом п'яти років функціонує в умовах недоторканого (ненагрітого) ґрунту — тобто без теплового впливу з боку метрополітену. У другому аналізувалася робота теплообмінника після 50-річного прогрівання ґрунту теплотою метрополітену.

Дослідження проводилося для трьох варіантів розташування теплообмінника відносно тунелю: на відстані 5 м, 7 м та 12 м. Температура фіксувалася в репрезентативній точці на стінці свердловини, що розташована на рівні залягання метрополітену.

У першому сценарії (рис. 6) температурний профіль зумовлений лише сезонною зміною температури ґрунту та поверхні, і, як видно, температура коливається в діапазоні приблизно від -2°C до $+22^{\circ}\text{C}$. У другому сценарії (рис. 7) результати свідчать про чітке зростання температури на стінці теплообмінника в усіх трьох випадках, що підтверджує наявність теплового впливу з боку тунелю.

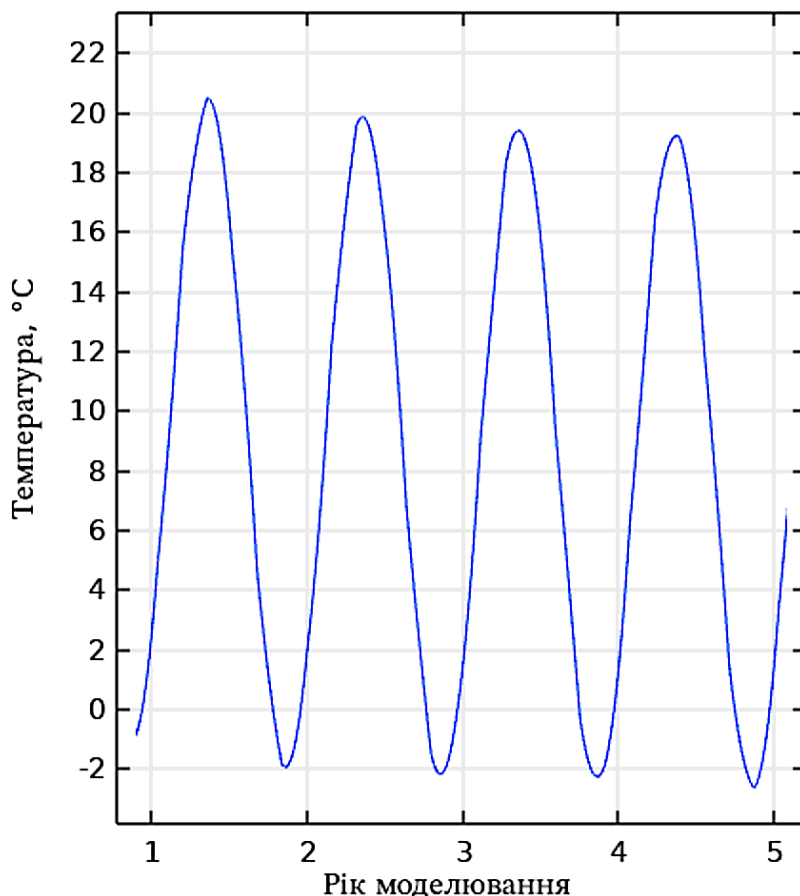


Рис.6. Змодельовані температури на стінці теплообмінника без урахування впливу метрополітену

Найбільший приріст температури спостерігається на відстані 5 м. Середньорічна температура на стінці теплообмінника підвищується приблизно на $2,3...2,6^{\circ}\text{C}$ порівняно з варіантом без впливу метрополітену. На відстані 7 м підвищення становить $1,5...2,0^{\circ}\text{C}$, а на 12 м – орієнтовно $0,7...1,1^{\circ}\text{C}$. Таке підвищення температури відіграє важливу роль у збільшенні ефективності системи теплового насоса за рахунок зменшення температурного навантаження на компресор та покращення коефіцієнта сезонної продуктивності (SPF).

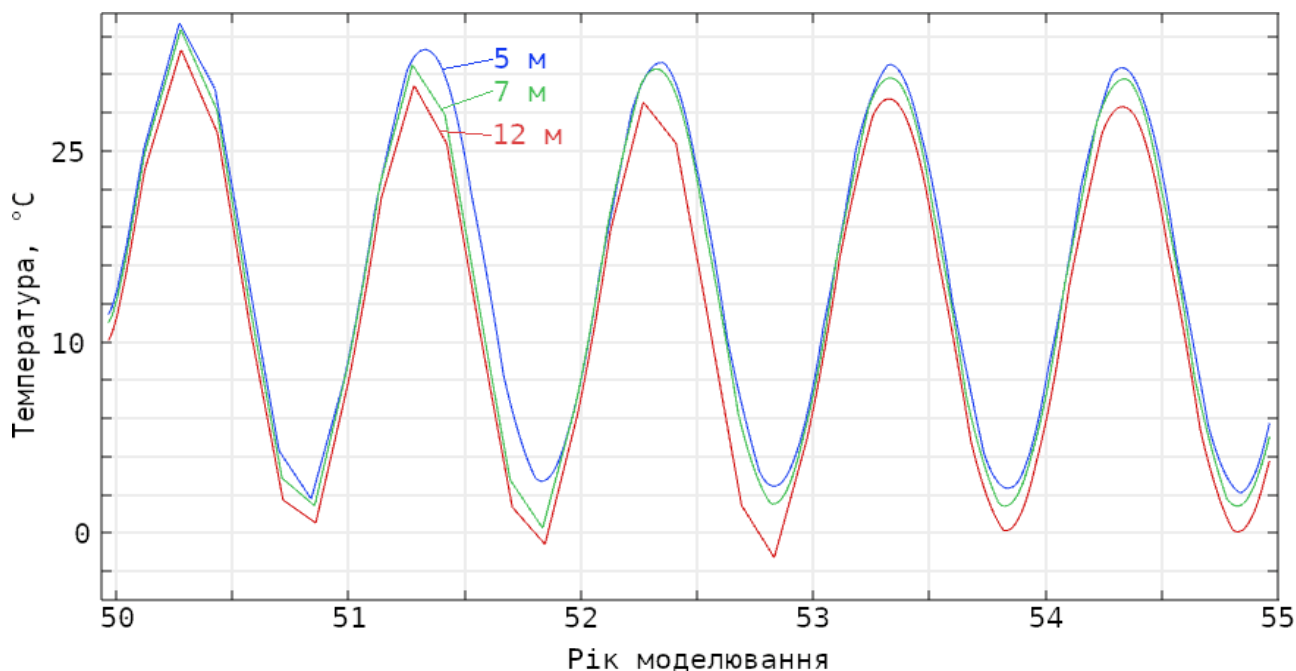


Рис. 7. Вплив тунелю метрополітену на температуру стінки теплообмінника протягом 5 років моделювання (51–56 роки загального періоду моделювання) в залежності від відстані до (5 м, 7 м, 12 м).

Висновки. Основні результати попереднього 2D-моделювання показали, що метрополітен впливає на роботу прилеглих вертикальних ґрунтових теплообмінників. Тому це дослідження заслуговує на подальше продовження для підвищення енергоефективності установок геотермальних теплових насосів. За допомогою моделювання двох сценаріїв (робота теплообмінника в ненагрітому ґрунті і після 50-річного прогріву тунелю) і трьох варіантів відстані від теплообмінників до тунелю (5 м, 7 м і 12 м) отримано чітке кількісне уявлення про те, як попереднє прогрівання змінює температурний режим стінки свердловини. Це підтверджує доцільність використання відпрацьованої теплоти метрополітену для підвищення продуктивності ґрунтових теплообмінників і відкриває шлях до практичного застосування такого підходу в міських системах теплопостачання.

References

1. Zadiranov V.S. “Review of the experience in utilising waste heat from the metro”. *Ventyliatsiia, Osvitlennia ta teplohozopostachannia*, Iss. 48, 2024, pp. 50–66. Available at: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.48.50-66> (In Ukrainian)
2. Lagoeiro, H.R.P. et al., “Heat from Underground Energy London (Heat FUEL)”, in The 25th IIR International Congress of Refrigeration, August, 2019, Montréal, Québec, Canada. Quebec: Institut International du Froid, 2019.

Available at: <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.1013>

3. Paris Habitat et la RATP récupèrent la chaleur du métro pour alimenter un immeuble de logements. Available at: <https://www.lemoniteur.fr/article/paris-habitat-et-la-ratp-recuperent-la-chaleur-du-metro-pour-alimenter-un-immeuble-de-logements.1998954>
4. Barcelona Subways Are Revolutionizing Energy Efficiency. Available at: <https://katrinapaulson.medium.com/barcelona-subways-are-revolutionizing-energy-efficiency-bfb897b9298f>
5. Toki, Y. “District heating and cooling system utilizing the waste heat from the subway in the city of Sapporo” in Proceedings of 14 Annual Conference of Industrial Electronics Society 24-28 October 1988, Singapore. IEEE, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1109/IECON.1988.666281>
6. Fialko, N.M. and Zimin, L.B., “Otsenka effektivnosti primeneniia teplovykh nasosov v usloviyakh metropolitenov i ugolnykh shakht”. Industrial Heat Engineering, Vol. 28, No. 2, 2006, pp. 111-119. Available at: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/0fe53fcd-26bc-4844-8c77-c01a9eff3238/content> (In Russian)
7. Zeng-Hui, H.U., Xiao-Zhao, L.I., Xiao-Bao, Zh., Lin, X. and Wei, W.U. “Numerical analysis of factors affecting the range of heat transfer in earth surrounding three subways”. Journal of China University of Mining and Technology, Vol. 18, 2008, pp. 67-71. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60015-2](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60015-2)
8. Spitler, J. D. et al. “R&D Studies Applied to Standing Column Well Design.” ASHRAE 1119-RP, July 2002. Web. 19 Dec. 2025. Available at: https://www.academia.edu/1594197/R_and_D_studies_applied_to_standing_column_well_design.
9. Özdoğan-Dölçek, A. Numerical Modeling of Heat Transport for Ground-Coupled Heat Pump (GCHP) Systems and Associated Life Cycle Assessments. PhD Thesis. University of Wisconsin-Madison, 2015. Available at: <https://asset.library.wisc.edu/1711.dl/CMGY7VD65SVVT8D/R/file-33b47.pdf>
10. DBN B.2.2-12:2019 Planuvannia i zabudova terytorii. Zi zm. No. 1 UkrArkhBudInform, 2019. Available at: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3783082322765547467 (in Ukrainian)
11. Tsodikov, V.Ia. Ventiliatsiia i teplosnabzhenie metropolitenov. Nedra, 1975
12. DSTU B V.2.6-189:2013 Methods for choosing of insulation material for insulation of buildings. Minrehion Ukrainy, 2025. Available at: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_6_189/5-1-0-1790
13. Nauchno-tekhnicheskii otchet ot 2013 g. KhG YGO «UkNIINTIZ» ob inzhenerno-geologicheskikh i gidrogeologicheskikh izyskaniyakh vdol st. Yuzhnyi

- vokzal. UkNIINTIZ, 2013 (In Russian)
14. Zakliuchenie inzhenerno-geologicheskogo otcheta na stroiploshchadke metropolitena v g. Kharkove ot 1967 g. UkNIINTIZ, 1967. (In Russian)
 15. Richtlinie VDI 4640 Blatt 2 Thermische Nutzung des Untergrunds – Erdgekoppelte Wärmepumpen. Available at: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/geologie/erdwaerme/fachgesprach/2015/Reuss_Vortrag.pdf (In German)
 16. Cui, Y and Zhu, J. “Year-round performance assessment of a ground source heat pump with multiple energy piles. Energy and Buildings, Vol. 158, 2018, pp. 509–524. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.033>.
 17. Cui, Y and Zhu, J. “CFD assessment of multiple energy piles for ground source heat pump in heating mode. Applied Thermal Engineering, Vol. 139, 2018, pp. 99–112. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.073>
 18. Adinolfi, M., Maiorano, R.M.S, Mauro, A., Massarotti, N. and Aversa, S. “On the influence of thermal cycles on the yearly performance of an energy pile”. Geomechanics for Energy and the Environment, Vol. 16, 2018, pp. 32-44. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gete.2018.03.004>
 19. Wu D, Liu H-L, Kong G-Q, Ng CWW and Cheng X-H. “Displacement response of an energy pile in saturated clay”. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Vol. 171, Iss. 4, 2018, pp. 285-294. Available at: <https://doi.org/10.1680/jgeen.17.00152>.
 20. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Building Climatology. Minrehionbud Ukrainy, 2011. Available at: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929 (In Ukrainian)
 21. Hordienko V.V., Hordienko Y.V., Zavgorodniaia O.V., Lohvinov Y.M., Tarasov V.N. and Usenko O.V., Geotermicheskii atlas Ukrainy, 2004. Available at: https://www.researchgate.net/publication/330933236_GEOTERMICESKIJ_ATLAS_UKRAINY (In Russian)
 22. Hellström, G.; Ground heat storage: thermal analyses of duct storage systems, Doctoral Thesis, Mathematical Physics, 1991. Available at: <https://lup.lub.lu.se/search/files/6178678/8161230.pdf>
 23. Lazzari S., Priarone A. and Zanchini E. “Long-Term Performance of Borehole Heat Exchanger Fields with Groundwater Movement”. Fuel and Energy Abstracts, Vol. 35, Iss. 12, 2010, pp. 4966-4974. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.028>
 24. DSTU B V.2.5-44:2010 Engineering equipment for indoor systems. Heating systems in buildings design of heat pump heating systems. Minrehionbud Ukrainy, 2010. Available at: http://www.mathcentre.com.ua/download/dstu_B_V_2-5-44_2010.pdf (In

Ukrainian)

25. Kharkivskiy rehionalnyi tsentr z hidrometeorolohii (KhRTsHM). Available at: <https://t.me/HRCGM>. Accessed 2025-11-01 (In Ukrainian)
26. Morozov Yu. P., Barylo A. A., Dubovskyi S. V. and Chalaiev D. M., Vydobuvannia i vykorystannia heotermalnykh resursiv Ukrainy. IVE, 2024. Available at: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%8F_%D0%9C%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0_Publication.pdf (IN Ukrainian)
27. DBN V.2.3-7-2010. Metros (Undergrounds) . Main aspects. UkrArkhdBudInform, 2019. Available at: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-201> (In Ukrainian)

UDC 662.997:621.176]:625.42(477.54-25) post-graduate **Vadym Zadiranov**,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.122-139>

SIMULATION OF METRO HEAT UTILISATION USING A VERTICAL GROUND HEAT EXCHANGER AND A HEAT PUMP IN KHARKIV

***Abstract.** As part of Ukraine's national energy sustainability strategy and international commitments to reduce greenhouse gas emissions, decarbonisation of the heat supply system is becoming a priority of the state energy policy. As a signatory to the Paris Agreement, Ukraine has committed itself to reducing CO₂ emissions and increasing the share of renewable energy sources. One of the most promising areas for improving energy efficiency in the urban environment is the utilisation of waste heat generated in the metro infrastructure. Underground transport systems, including tunnels and metro stations, accumulate a significant amount of heat due to train braking systems, ventilation, engineering equipment and passenger traffic. Foreign studies have used various approaches to its extraction: installing a heat exchanger in metro ventilation shafts; attaching absorption pipes to geotextiles between the metro lining; absorption pipes were built into a tunnel segment; installing heat exchangers near the tunnel. Such solutions have been successfully implemented in cities such as London, Paris, Barcelona and Tokyo. Some studies have been conducted on the utilisation of low-potential heat from metro ventilation emissions in Ukraine. However, they were limited to analysing the heat*

exchange between ventilation emissions and the heat pump system. At the same time, the potential for using the accumulated heat in the surrounding soil near the metro overrun tunnels, which have been operating for decades and form a stable temperature field in the massif, remains undiscovered in Ukraine. The topic of increasing the performance of geothermal heat pumps using metro exhaust heat has not been studied in Ukraine to date. Therefore, this article is devoted to this research. The main results of preliminary 2D modelling showed that the metro affects the operation of adjacent vertical ground heat exchangers. Thus, this research deserves further continuation to improve the energy efficiency of geothermal heat pump installations. By modelling two scenarios (heat exchanger operation in unheated soil and after 50 years of tunnel heating) and three options for the distance from the heat exchangers to the tunnel (5 m, 7 m and 12 m), a clear quantitative picture was obtained of how preheating changes the temperature regime of the borehole wall. This confirms the feasibility of using waste heat from the metro to increase the productivity of ground heat exchangers and paves the way for the practical application of this approach in urban heating systems.

Keywords: metro, vertical ground heat exchanger, heat recovery.

Received/Надійшла до редакції	03.07.2025
Reviewed/Рецензована	05.11.2025
Accepted/Прийнята	12.11.2025