

УДК [662.997:621.176]:625.42

аспір. **Вадим Задіранов**,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова

ОГЛЯД ДОСВІДУ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ МЕТРОПОЛІТЕНУ

***Анотація.** Вичерпність традиційних викопних джерел енергії веде до дедалі ширшого освоєння нетрадиційних джерел енергії. Одним із перспективних напрямів альтернативної енергетики є використання низькопотенційної енергії ґрунтового масиву для опалення будівель і споруд різного призначення за допомогою теплового насоса. У метрополітені виділяється значна кількість теплоти, особливо під час гальмування поїздів, їхнього зупинення на платформах та під час набирання швидкості при початку руху від станції. У сучасних метрополітенах України, система вентиляції спроектована таким чином, щоб справлятися зі зростанням температури в тунелях і на станціях. У цій статті розглядається можливість використання скидної теплоти підземних залізничних систем як джерела низькопотенційної енергії для забезпечення теплою, наприклад, прилеглих будівель. Представлено різні технології утилізації теплоти, що відходить з підземних залізничних тунелів, які вже було реалізовано або моделі яких технічно та економічно обґрунтовано.*

Ключові слова: тепловий насос, скидна теплота, утилізація теплоти, метрополітен, енергетичний тунель, геотермальна енергія

Вступ. Однією з найбільш нагальних проблем людства є постійне зростання споживання енергії. У зв'язку з цим останні десятиліття у світі значно зріс інтерес до альтернативних поновлюваних джерел енергії. Це викликано не лише обмеженістю ресурсів викопної сировини, а й необхідністю вирішення екологічних проблем. Згідно зі звітами експертів спільноти REN21 станом на 2022 рік майже 50% загального споживання енергії та 40% викидів парникових газів припадає саме на опалення та охолодження приміщень, включно з нагріванням води.

У липні 2021 року Уряд України затвердив мету – до 2030 року зменшити викиди парникових газів на 65% від рівня 1990 року. Понад 130 країн світу розробили й офіційно ухвалили стратегії з декарбонізації економіки. Україна також взяла на себе подібні зобов'язання: 2023 року було створено Державний

фонд декарбонізації та енергоефективної трансформації.

Не дивно, що попит на відновлювані джерела енергії, такі як геотермальні; утилізацію скидної теплоти промислових підприємств і підземних залізниць постійно зростає. Використання джерел низькопотенційної енергії за допомогою теплових насосів є ефективним рішенням і з кожним роком стає все більш популярним.

Залізничні тунелі є надійним джерелом відпрацьованої теплоти в містах, де громадський транспорт значною мірою залежить від підземних систем метро. Система метрополітену споживає велику кількість електричної енергії під час його регулярної роботи. Споживана електрична енергія перетворюється на теплоту. Дослідження показали, що в ґрунтах, які оточують тунелі метрополітену, відбувається накопичення теплової енергії, що виділяється в процесі експлуатації. Навколо тунелю відбувається формування теплового резервуара, унаслідок чого підвищується температура повітря в тунелі. Сучасні технології дають змогу здійснювати відведення теплоти з подальшим його використанням на обігрів будівель на поверхні, а також для обігріву приміщень станцій метрополітену. Наприклад, компанія Paris Habitat, яка надає жителям французької столиці комунальні послуги, з 2011 р. обігріває 17 квартир житлового будинку, розташованого над станцією метро, за рахунок надлишкової теплоти, що виділяється під час руху електропоїздів, силовими трансформаторами, від пасажиропотоків тощо. У метрополітені Стокгольма аналогічні тепловиділення дають змогу нагрівати воду, яку потім застосовують для опалення 13-поверхової офісної будівлі.

Однак під час використання тепла, що відходить з підземних систем метрополітену, виникає безліч проблем, і важливо ретельно вибрати найбільш доцільну технологію для утилізації теплоти, що відходить, з тунелів, з максимальною енергоефективністю без будь-яких ризиків для безпечної та надійної роботи міських транспортних систем.

Актуальність дослідження. Утилізація скидної теплоти метрополітену за допомогою теплових насосів є енергоефективним рішенням. До того ж воно дасть змогу значно скоротити викиди парникових газів.

Формулювання цілей статті. Аналіз можливостей і технологій утилізації скидної теплоти залізничних тунелів метрополітену.

Підземний метрополітен як міське джерело скидної теплоти. За даними Міжнародної асоціації громадського транспорту (UITP) у 2019 році метрополітени світу перевозили майже 190 мільйонів пасажирів на день [1]. Наприклад, пасажиропотік лише Лондонського метрополітену становив 1,5 мільярди пасажирів на рік. Якщо взяти для прикладу метрополітен України, то згідно з даними Головного управління статистики в Харківській області за

2021 р. кількість перевезених пасажирів Харківським метрополітенем становила 158 585,6 тис. пасажирів [2]. Ці значення, ймовірно, зростатимуть і надалі через збільшення транспортних систем і кількості жителів мегаполісів.

Пасажири вимагають частіших і швидших поїздів, що призводить до зростання споживання енергії, значна частина якої зрештою буде відводитися в тунель у вигляді теплоти. Значна частина цієї енергії може бути регенерована, проте частина, що залишилася, все одно створює велике теплове навантаження на навколишнє середовище тунелю. Це було доведено в роботі [3], де показано, що основним джерелом теплоти в тунелі є гальмівний механізм, а у вагоні поїзда - пасажири (рис.1 і 2)

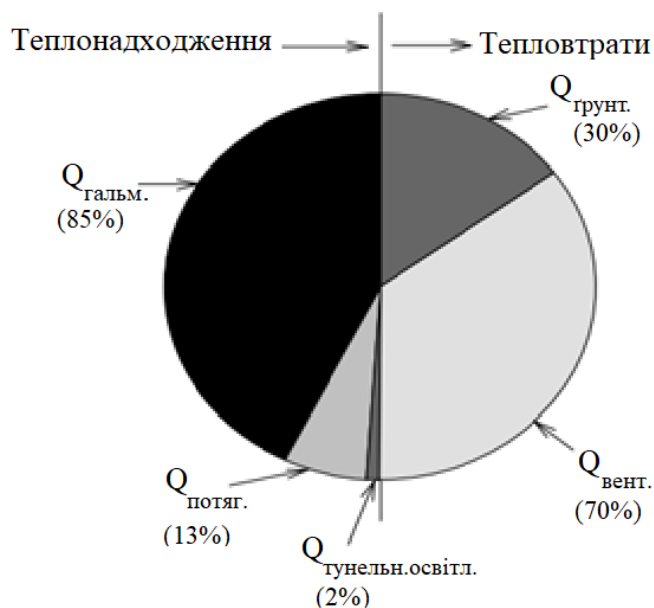


Рис.1 Тепловий баланс для тунелю

Грунт, що оточує типовий глибокий тунель підземних залізничних сполучень, також містить велику кількість теплової енергії через ефект тепловідведення, який земля забезпечує тунелю. У роботі [3] показано, що теплота, поглинута землею, що оточує підземний залізничний тунель, становить 30 % від загального тепловиділення і містить приблизно 4500 ГДж теплової енергії на кілометр тунелю. Ця енергія є низькопотенційною і має температуру приблизно від 20 °С до 30 °С [4]. Важливо зазначити, що в роботі [3] використовувалися тільки розрахунки в стаціонарному режимі з постійним коефіцієнтом конвективної теплопередачі. Результати попередніх досліджень показали, що між геотермальним тепловим насосом і підземним залізничним тунелем існує взаємодія, і тому ця область заслуговує на подальше вивчення для підвищення енергоефективності установок геотермальних теплових насосів поблизу метрополітену.

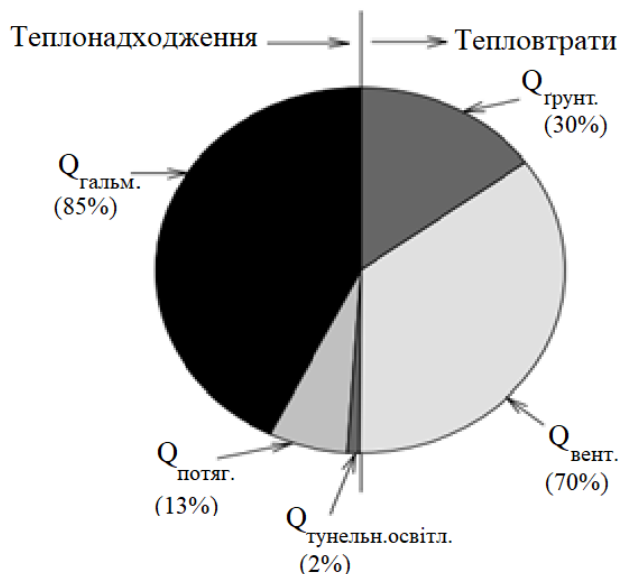


Рис.2 Тепловий баланс для вагону

Потенціал відновлення вторинної енергії з підземних залізничних тунелів у Великій Британії досліджували й у роботі [5], які проаналізували повітряний потік, температуру повітря та відносну вологість у тридцяти різних точках мережі метрополітену Глазго. Автори виміряли річні температури на станції метро Глазго і показали, що вони становлять від 15 до 18 °С, у той час як середні зовнішні температури можуть коливатися від 4 до 16 °С, що вказує на те, що теплові насоси можуть працювати більш ефективно, використовуючи підземне повітря метрополітену як джерело тепла.

Потенціальні технології утилізації відхідної теплоти з підземних залізничних тунелів.

Теплообмінник встановлюється у вентиляційній шахті метрополітену. Джерелом теплоти, в даному випадку, є повітря температурою від 20 °С до 28 °С. Технологію вилучення теплоти було проаналізовано в [6]. Досліджувалася можливість утилізації теплоти, що відходить із вентиляційних шахт мережі лондонського метрополітену, шляхом впровадження повітряно-водяного теплообмінника, під'єданого до теплового насоса. Потенційна економія енергії, зменшення викидів вуглецю і витрат системи була розрахована порівняно з традиційним охолодженням і опаленням, що ґрунтуються, відповідно, на системах охолодженої води і газових котлах. Результати показали, що система утилізації теплоти, яка відходить, може призвести до значної економії:

- на 79 % менша кількість споживаної енергії
- на 48 % менші викиди парникових газів
- на 82 % менші експлуатаційні витрати.

Аналогічна схема реалізується в лондонському районі Іслінгтон. Схема, відома як система утилізації відпрацьованої теплоти Bunhill 2, заснована на

встановленні теплообмінника всередині вентиляційної шахти мережі Лондонського метрополітену [7].

На першому етапі система вловлює теплоту, що виділяється метрополітеном, для чого у вентиляційній шахті встановлюється теплообмінник "повітря-вода". Теплообмінник, який використовується в цій системі утилізації відпрацьованої теплоти, – це вентиляторний довідник. Вентиляційну шахту було адаптовано для розміщення теплообмінника. Для цього було побудовано будівлю, в якій було встановлено теплообмінники, а також модернізовано реверсивний вентилятор з регульованою швидкістю обертання, що знаходиться у вентиляційній шахті. Реверсивний вентилятор дає змогу системі працювати або на витяжці гарячого повітря з підземного приміщення, яке потім можна використати для нагрівання води в змішувачах, або на використанні навколишнього повітря, яке охолоджують змішувачі, і потім подають до підземного приміщення, а видобуту теплоту утилізують теплообмінником (рис. 3).

Температура повітря, що виходить через вентиляційну шахту, варіюється від 18°C до 28°C. Таким чином, перший водяний контур, що переносить тепло від вентиляційної шахти до теплового насоса, також працюватиме з температурами припливу і витяжки, що змінюються залежно від сезону року. Очікувані робочі температури подавання та звороту варіюються від 11 до 18 °C і від 6 до 13 °C, відповідно.

Після відбору теплоти у вентиляційній шахті перший водяний контур передає рекуперовану теплоту до двоступеневого теплового насоса "вода-вода", який спроектовано з урахуванням температури подавального та зворотного трубопроводів мережі централізованого тепlopостачання 55 °C і 75 °C, відповідно. Оскільки випарник і конденсатор працюють з великою різницею температур, то в цьому випадку було використано двоступеневий тепловий насос. Одноступеневе стиснення призвело б до зниження ефективності та продуктивності системи.

Для акумулювання та зберігання теплової енергії встановлено теплоаккумуляційний бак, заповнений водою об'ємом 77,5 м³. Накопичення енергії має вирішальне значення для управління піковим попитом, забезпечуючи надійність системи в цей період. Трубопровідна мережа при цьому дуже добре ізольована, щоб звести до мінімуму втрати тепла на шляху до будівель.

Ця технологія дає змогу витягти значну кількість теплоти з мінімізацією перебоїв у обслуговуванні. При цьому з вентиляційної шахти утилізується 780 кВт теплоти.

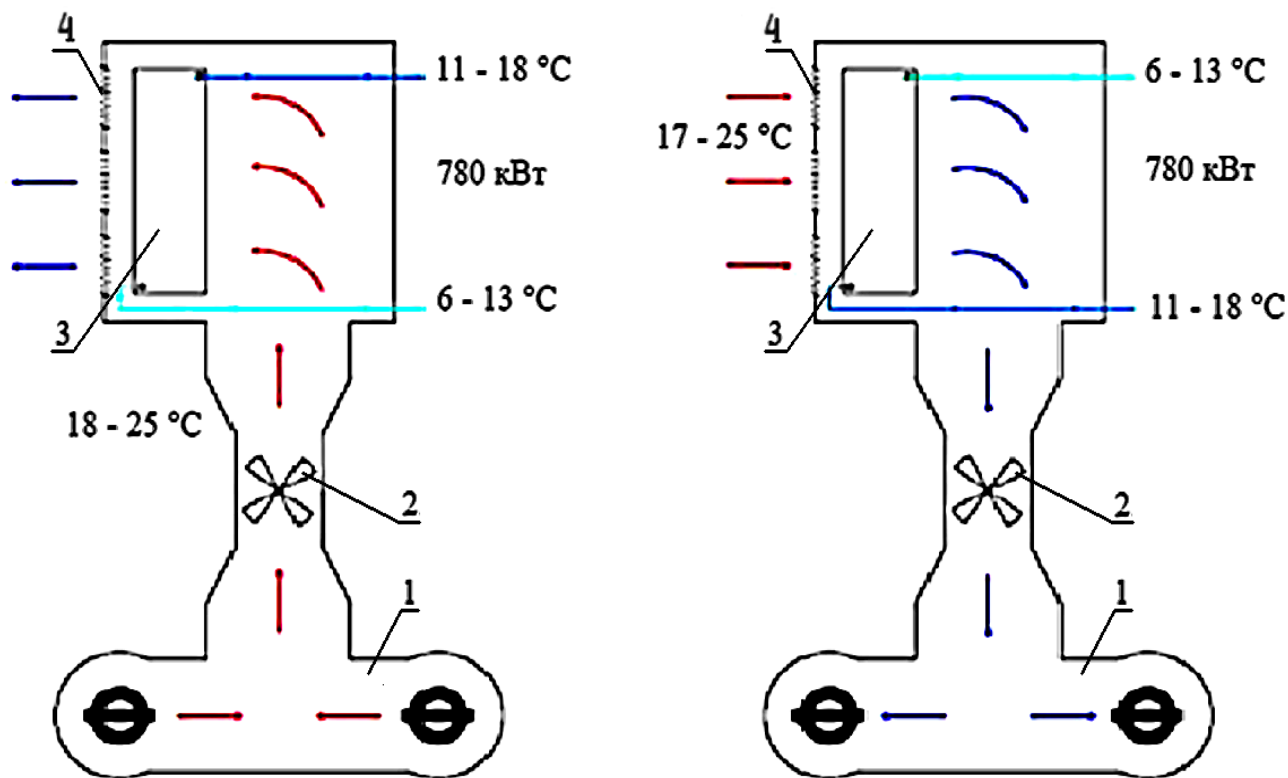


Рис.3 Схема теплообмінника та вентиляційної шахти енергетичного центру Bunhill 2 [7]

Технологія дає змогу знизити потенційний викид вуглецю на 82 % у 2022 році та зменшити витрату коштів на електроенергію на 14%. Однак ця технологія все ще має обмеження, пов'язані з наявною системою вентиляції лондонського метрополітену, а саме обмежений простір усередині наявних шахт і низька потужність вентиляторів, що використовуються для вентиляції.

Геотермальні теплові насоси поруч з тунелем метрополітену. Грунт, що оточує типовий тунель глибокого рівня закладення метрополітену, виділяє велику кількість теплової енергії завдяки тепловідведенням тунелю до землі. Ця енергія низького потенціалу може бути вилучена прилеглими теплообмінниками. Однак, існує обмеження на те, наскільки близько до тунелів можна монтувати систему. Мінімальна відстань, яку допускає Лондонський метрополітен, становить близько 3 м по горизонталі та 6 м по вертикалі [8]. У літературі дослідники наводять різні значення відстані теплового ефекту від стіни тунелю метрополітену до ґрунту. У роботі [9] виміряно зміни температури ґрунту поруч із прохідними тунелями до відкриття пасажирського руху по лінії Вікторія в Лондоні. Через чотири роки після початку руху стабільні температурні умови ще не були досягнуті, і за 9,1 м від тунелю температура глини продовжувала підвищуватися. У роботі [10] припускається, що тепловий ефект від стіни залізничного тунелю, збудованого в алевритовій глині, може досягати 20 м. Це означає, що ділянки тунелю глибокого закладення завдовжки

136 км і діаметром 3,7 м потенційно можуть забезпечити значний об'єм ґрунту орієнтовно понад 200 млн м³. Цей ґрунт містить значну кількість низькопотенційної енергії для потенційного використання прилеглими теплообмінниками, під'єднаними до теплового насоса (рис. 4).

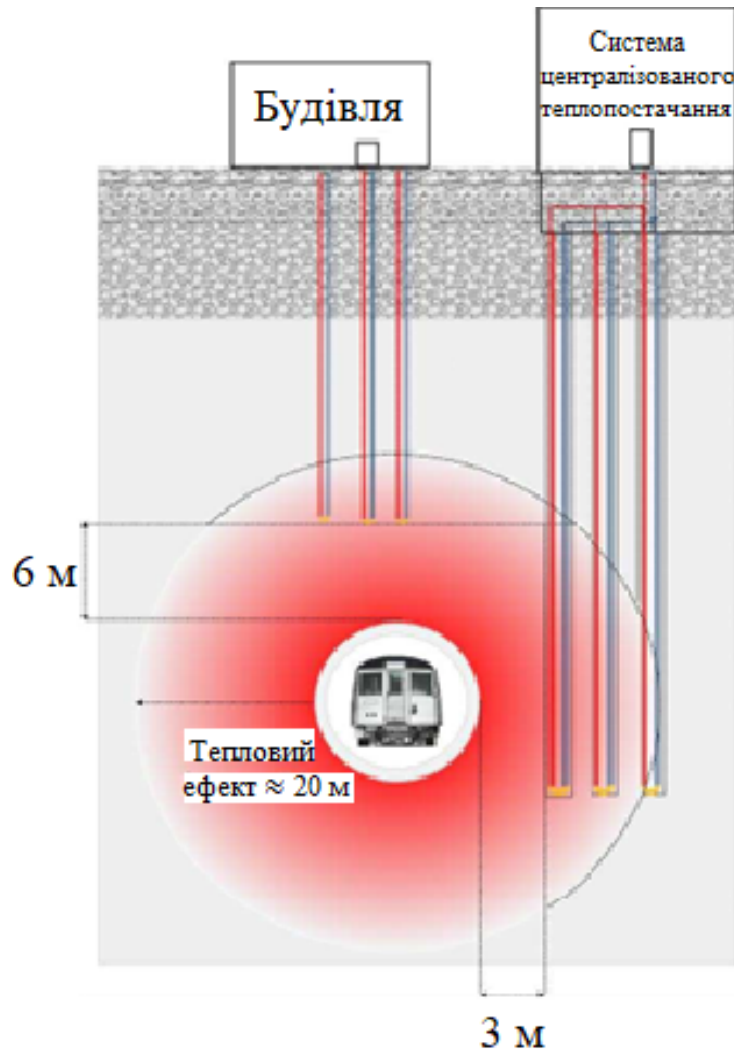


Рис. 4 Тепловий ефект від ґрунту навколо тунелів

Було розроблено модель скінченних елементів [11,12] для аналізу можливостей підвищення продуктивності теплових насосів під час розміщення поруч із залізничними тунелями, оскільки різні конфігурації теплообмінників з різною кількістю рядів і петель, розмірами, а також близькістю до тунелів можуть вплинути на їхню швидкість тепловідведення. Як приклад було обрано Лондон, тому геометричні параметри, властивості матеріалів, початкові, граничні та робочі умови, реалізовані в моделі, були засновані на типових умовах для столиці Великої Британії. Результати чисельних досліджень показали, що продуктивність системи можна підвищити до 43% залежно від її розміру, форми та близькості до тунелю. Це підвищить продуктивність

теплового насоса, що призводить до суттєвої економії як експлуатаційних витрат, так і викидів вуглекислого газу. Результати також показали, що для досягнення більшого теплового ефекту від тунелю на вертикальний ґрунтовий теплообмінник його геометричний центр повинен бути розташований якомога ближче до геометричного центру тунелю. Для того, щоб мати змогу охарактеризувати теплову взаємодію між підземним залізничним тунелем і вертикальним ґрунтовим теплообмінником, було запроваджено нову геометричну змінну, яка визначається як близькість взаємодії (Ω). Було показано, що існує майже лінійна залежність між цією змінною і середнім тепловим навантаженням теплообмінника. Автори підраховали, що за температури в тунелі від 20 до 30 °С можна видобути кількість теплової енергії, що дорівнює від 20 до 29 Вт/м довжини свердловини.

Прикладом встановлення геотермального теплового насоса в безпосередній близькості від тунелів Лондонського метрополітену є будівля під назвою One New Change. Ця будівля складається з 52 000 м² офісів і торгових площ на восьми поверхах. Геотермальна схема охоплює 219 енергетичних паль заввишки до 38 м і діаметром 2,5 м, а також двох глибоких водяних свердловин, які йдуть на 140 м углиб землі. Деякі з його вертикальних теплообмінників розташовано на відстані 7 м від стіни тунелю Центральної лінії Лондонського метрополітену. Загальна потужність системи геотермального теплового насоса на опалення та охолодження становить, відповідно, 1,6 МВт і 1,7 МВт.

Зазначена технологія здатна утилізувати теплоту з наявних залізничних тунелів, оскільки її можна використовувати незалежно від конструктивних елементів тунелю. Однак, високі капітальні витрати, пов'язані з бурінням свердловин, є недоліком застосування цього рішення. Інше питання, пов'язане з розвитком цієї технології, стосується власності на землю, оскільки теплові насоси доведеться встановлювати вздовж тунелів, на територіях, що можуть перебувати у приватній власності.

Енергетичні палі, енергетичні діафрагмові стіни, енергетичні платформи. Енергетичні палі, фундаменти, стіни та інші термоактивні ґрунтові конструкції покриттів є інноваційною технологією, яка сприяє захисту довкілля і забезпечує значну довгострокову економію коштів і мінімізацію технічного обслуговування. Абсорбційні труби, заповнені теплоносієм, встановлюються у звичайних конструктивних елементах (палі, діафрагмові стіни, фундаментні плити) з утворенням первинного контуру геотермальної енергетичної системи. Природна температура ґрунту використовується як джерело теплоти взимку та охолодження влітку. Первинний контур приєднується через тепловий насос до вторинного контуру всередині будівлі. За останні 20 років технологія енергетичних фундаментів та інших термоактивних систем наземних джерел

розвивалася надзвичайно активно, і новаторську роль тут відіграє Австрія.

Щоб модернізувати залізничну лінію між Віднем і Західною Європою для роботи в чотириколіїному режимі, було збудовано тунель Lainzer завдовжки 12,8 км, в якому на ділянці LT 24 було встановлено абсорбційні труби-теплообмінники. На одній ділянці тунелю Lainzer обшивка основної бічної стінки складається з буронабивних паль, при цьому кожна третя паля використовується як енергетична [13] (рис. 5, 6).

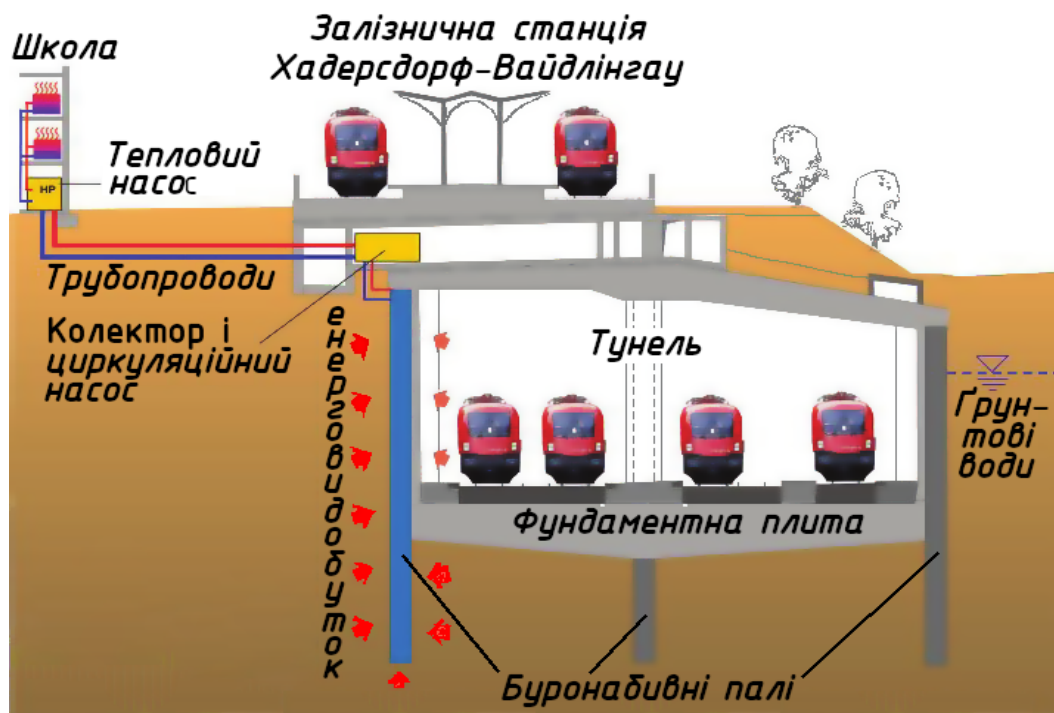


Рис.5. Схематичний поперечний переріз енергетичної установки на 150 кВт з річним обсягом видобутку 214 МВт·год під залізничною станцією Hadersdorf-Weidligau, де одна бічна стінка прохідницького тунелю використовується як енергетична стінка.

Первинне оздоблення (рис. 6) складається з буронабивних паль із колонами, залитими струменевим розчином між ними, і з'єднується з водонепроникною вторинною обшивкою за допомогою дюбелів. Кожна третя паля оснащена абсорбційними трубами, які розташовано за арматурними стрижнями і в такий спосіб захищено від пошкоджень шляхом встановлення дюбелів у внутрішньому облицюванні (залізобетонні панелі). На рис. 6 також показано розташування вимірювальних приладів у палі S-07-xx. Таким чином, дана енергетична установка складається з 59 буронабивних паль діаметром 1,2 м і середньою висотою близько 17,1 м. Абсорбційні труби з'єднано з колекторними трубами, що проходять через службове приміщення до шести теплонасосних установок сусідньої будівлі школи для її опалення.

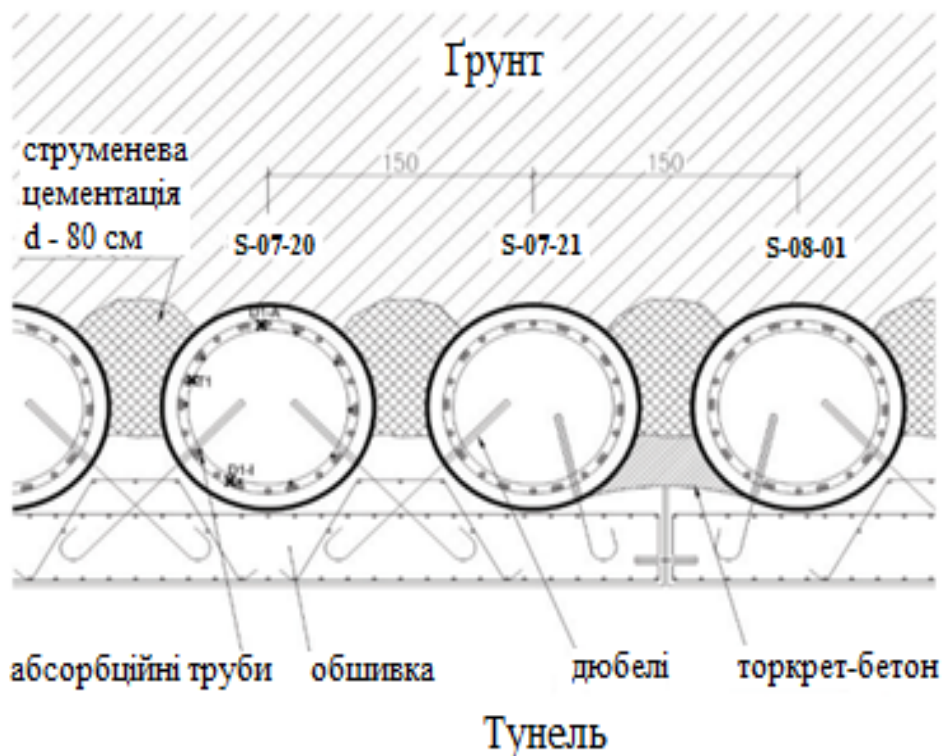


Рис. 6. Схема системи енергетичних палів

Початкова експлуатація енергоустановки розпочалася в лютому 2004 року. Близько 70 МВт·год теплової енергії було видобуто з енергетичних палів протягом перших місяців роботи. З осені 2004 року енергосистема забезпечує геотермальною теплотою сусідню школу. Під час другого опалювального періоду взимку 2004/2005 року видобуто 186,2 МВт·год геотермальної теплоти, тоді як у 2005/2006 році було отримано 193,9 МВт·год. Ця кількість геотермальної енергії відповідала прогнозованій максимальній продуктивності за опалювальний сезон. Крім того, технологія є екологічно чистою та дозволяє скоротити споживання природного газу на 34000м³ на рік, що призводить до зниження річних викидів CO₂ на 30 т.

Дана технологія підходить для неглибоких тунелів, побудованих методом виїмки та покриття, що складаються з буронабивних стін, а також залізобетонних фундаментних плит і покриттів. Такі неглибокі тунелі роблять застосування цієї технології привабливішим, ніж глибокі тунелі, оскільки передача теплоти між джерелом і користувачем спрощується.

Абсорбційні труби прикріплені до геотекстилю між обшивкою тунелю. У рамках дослідницького проекту, відомого як GeoTU6 [14], поруч із тунелем Штутгарт-Фазаненхоф було прокладено геотермальний випробувальний маршрут. Проект GeoTU6 є практичним дослідженням використання геотермальної теплоти тунелів у внутрішніх міських районах. Цей проект вдалося реалізувати Інституту геотехніки Штутгарта під час будівництва

тунелю Фазаненхоф, викопаного методом NATM (New Austrian Tunnel Method). Основні питання GeoTUB пов'язані з будівництвом геотермальної випробувальної ділянки, дослідженням властивостей геотермальних надр, реєстрацією температури надр, бетону й повітря, чисельними дослідженнями і моделюванням для встановлення ефективності абсорбційної системи і визначення діапазону зміни температури в навколишньому шарі, а також визначення еталонних параметрів для майбутніх геотермальних проєктів при прокладанні тунелів.

Суть технології полягає в монтуванні абсорбційних труб на геотекстиль, встановлений у зоні склепіння між торкрет-бетонною зовнішньою оболонкою і внутрішньою оболонкою з монолітного бетону. У кожному випадку було сформовано два контури, які склалися з абсорбційних труб завдовжки близько 400 м на площі близько 180 м². Були використані труби зі зшитого поліетилену високого тиску (25 x 2,3 мм), які кріпилися меандром між зовнішньою і внутрішньою обшивкою тунелю. Абсорбційні труби було з'єднано паралельно, що призводить до зменшення гідравлічного опору системи в поєднанні з поділом на два контури, що, крім іншого, спрощує продування труб. На рис. 8 показано попередньо зібрані абсорбційні труби.

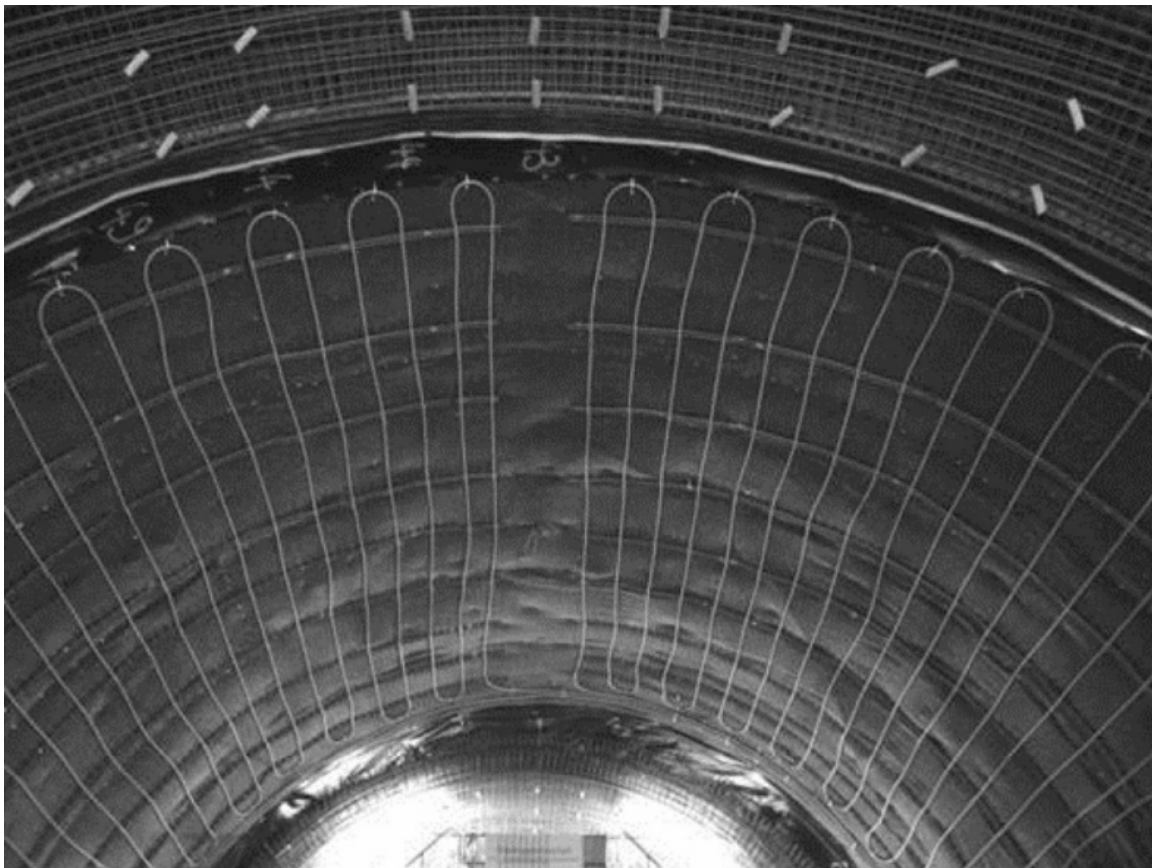


Рис. 7 Абсорбційні (поглинальні) труби, прикріплені до внутрішнього облицювання тунелю [14]

Активовані тунельні блоки оснащено системами реєстрації даних температури повітря в тунелі, футерування, а також навколишнього ґрунту. У кожному термоактивованому тунельному блоці встановлено кілька вимірювальних датчиків згідно з рис. 8, які вимірюють температуру у внутрішньому оздобленні тунелю. На основі цих даних можна розрахувати щільність теплового потоку зсередини тунелю за його радіусом.



Рис. 8 Поперечний розріз облицювання тунелю

У підсумку всіх режимів роботи до квітня 2015 року, спостерігалось теплове навантаження до 20 Вт/м^2 [15]. Подальші дослідження показують, що за рахунок встановлення оптимізованих робочих параметрів густина теплового потоку може бути ще більшою.

Дана технологія установки геотермальних абсорбційних систем для охолодження та опалення станцій/ліній метрополітену підходить для тунелів, побудованих методом NATM. Технологія є не тільки екологічно чистою, а й високоекономічною інновацією.

Абсорбційні труби вбудовані в сегменти тунелю. Під час проектування підземних залізничних систем, побудованих із використанням механізованих тунелів, необхідно використовувати інший підхід до проектування. Конструкцію залізничних тунелів з абсорбційними трубами, вбудованими в сегменти обшивки тунелю, а саме систему тунельного енергетичного сегмента (TES), проаналізували автори [16], які показали, як можна забезпечити охолодження тунелів Crossrail у Лондоні, з утилізацією теплоти для обігріву прилеглих будівель. Термічні сегменти обшивки обмінюються теплотою з геологічними породами за допомогою теплопровідності, а також отримують тепловий потік від повітря в тунелі. Тепломеханічна модель була розроблена методом скінченних елементів з використанням мультифізичного програмного забезпечення для моделювання теплових характеристик системи TES шляхом аналізу того, як різне теплове навантаження впливає на температуру рідини-теплоносія. Результати показали, що густина теплового потоку обмежена

ризиком замерзання рідини і може досягати 30 Вт/м^2 [16].

Подібна система була запропонована у [16,17], де чисельно проаналізовано можливість розроблення енергетичного тунелю в Турині.

Аналіз ґрунтувався на розробленні скінченно-елементної термогідромоделі для моделювання теплопередачі між трубами абсорбера всередині тунелю і навколишнім середовищем. Пропонована конструкція також складалася із закладених абсорберних труб у збірне залізобетонне облицювання тунелю і могла працювати в режимах охолодження й обігріву (рис. 9).

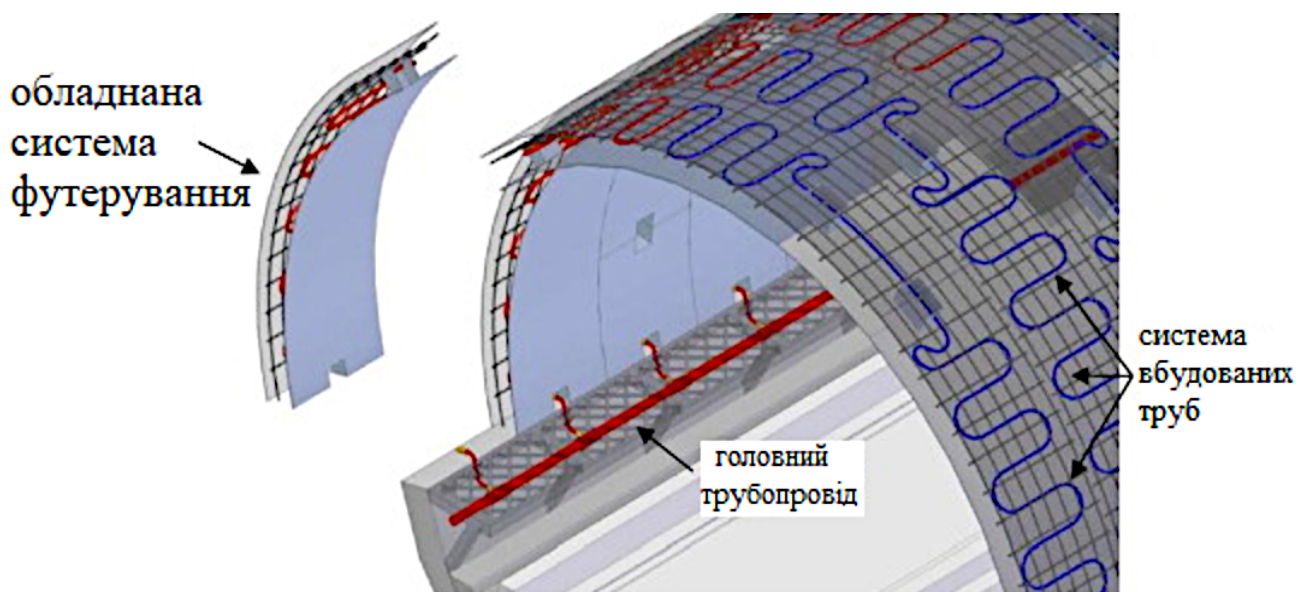


Рис.9 Схематичне зображення сегментного оздоблення тунелю, обладнаного ґрунтовим теплообмінником [17].

Завдяки сприятливим умовам течії підземних вод у Турині система обшивки енергетичного тунелю дає змогу досягти щільності теплового потоку від 53 до 74 Вт/м^2 узимку й улітку, відповідно. Ці значення дадуть змогу покрити потреби в енергії до $1,67 \text{ кВт}$ у режимі обігріву та $2,34 \text{ кВт}$ у режимі охолодження, з огляду на загальну довжину тунелю, що відповідає потребам в опаленні та охолодженні вежі регіону П'емонте. За відсутності потоку ґрунтових вод термічно активні тунелі можуть забезпечити теплообмін приблизно від 10 - 20 Вт/м^2 .

Можливості впровадження утилізації теплоти метрополітену. Перевага інтегрування термоактивних систем у геотехнічні конструкції, як-от тунелі, полягає в тому, що конструкції будують у будь-якому разі, і, отже, додаткові витрати на їхнє встановлення невеликі порівняно із загальною вартістю. Термоактивні тунелі та наземні конструкції можуть забезпечити високу швидкість відведення теплоти. Однак, ці технології можуть застосовуватися тільки для нових проєктів метрополітену і не підходять для утилізації теплоти з

наявних тунелів. З цієї причини геотермальні технології мають бути долучені до геотехнічного проектування на ранній стадії, що допомагає налагодити міждисциплінарне співробітництво між командами, відповідальними за проектування носійної конструкції ґрунту і системи утилізації теплоти, що може скоротити час і витрати на установку, пов'язані з активним використанням енергії структурних елементів. Для наявних станцій і тунелів на сьогодні можлива утилізація теплоти витяжного повітря за рис. 3, але через додатковий аеродинамічний опір теплообмінників системи можуть вимагати модернізації вентиляційних установок.

Висновки. У результаті вивчення світових досліджень утилізації скидної теплоти метрополітену виявлено, що основним джерелом теплоти в тунелі є гальмівний механізм (85%), а у вагоні поїзда - пасажирів (74%). Тепловиділення однієї людини становлять близько 150 Вт. Безперервний стабільний тепловий ефект від рухомого складу становить 300-350 Вт/м залежно від типу поїзда, швидкості, завантаження та частоти руху. Встановлено теплове навантаження при застосуванні різних технологій утилізації скидного тепла залізничних тунелів. Теплообмінник усередині вентиляційної шахти метрополітену (Bunhill, Лондон, Великобританія) утилізує до 900 кВт теплоти з шахти за температури повітряного джерела теплоти 20-28°C. При установленні теплового насоса з ґрунтовим вертикальним теплообмінником поруч із лінією метрополітену (математичне моделювання, Лондон, Великобританія) густина теплового потоку становила від 20 до 29 Вт/м довжини свердловини при температурі в тунелі 20-30 °C. Абсорбційні труби встановлені в буронабивних палях (Lainzer, Відень, Австрія, за температури джерела теплоти понад 20 °C дають густину теплового потоку до 30 Вт/м² площі контакту із землею. Абсорбційні труби, прикріплені до геотекстилю між обшивками залізничного тунелю (GeoTU6, Штутгарт, Німеччина) за вихідної температури повітря 6,5 °C надають густину теплового потоку до 20 Вт/м² площі тунелю. Абсорбційні труби в сегментах тунелю (Crossrail, Лондон, Великобританія) за температури повітря 17-36 °C видобувають густину теплового потоку 10-30 Вт/м², а в тунелі метрополітену (Турин, Італія) за вихідної температури джерела теплоти 14 °C – 48-53 Вт/м². Таким чином, отримується суттєва кількість теплоти для обігріву сусідніх будівель. Проте рішення з убудованими абсорбційними трубами в конструкції тунелю придатні лише для нового будівництва, що вимагає тісної кооперації конструкторів з інженерами інших спеціальностей.

References

1. Statistics-Brief-Metro-Figures-2021. <https://www.uitp.org/publications/metro-world-figures-2021/>. Accessed 5 October 2023
2. Pasazhyrski perevezennia v 2021 rotsi. <http://kh.ukrstat.gov.ua/2021pasagirperevez/4283-arkhiv-pasazhirski-perevezennya-u-2021-rotsi>. Accessed 5 October 2023
3. Ampofo F, Maidment G, Missenden J. “Underground railway environment in the UK. Part 2: Investigation of heat load.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 24 iss. 5-6, 2004, pp. 633–645. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.018>.
4. Thompson J, Gilbey M, Maidment G. “Geothermal cooling of underground railways – the opportunity.” *Proceedings of the Institute of Refrigeration*, vol. 105, 2008.
5. Ninikas K., Hytiris N., Emmanuel R., Aaen B., Younger, P.L. Heat recovery from air in underground transport tunnels. *Renewable Energy*, vol. 96, part A, 2016, pp. 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.015>
6. Davies G., Boot-Handford N., Grice J., Dennis W., Rami R., Nicholls A., Maidment G. “Metropolitan Integrated Cooling and Heating.” *Proceedings of the ASHRAE Winter Conference, Las Vegas, NV, USA, 28 January–1 February 2017*. https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/b9c7a2f1ad19bceffa501f715c7aed7f057ed307024051ef53946403d7552095/516687/Paper_21109_Metropolitan_Cooling_and_Heating%20Final.pdf
7. Lagoeiro H., Revesz A., Davies G., Maidment G. “Heat from Underground Energy London (Heat FUEL).” *CIBSE Technical Symposium, Sheffield, UK 25-26 April, 2019, Session 10 Paper 1*
8. Deed concerning the mitigation of the effects of settlement arising from the construction works undertaken at [Location]. <https://content.tfl.gov.uk/nle-draft-settlement-deed.pdf> Accessed 5 October 2023
9. Cockram I.J., Birnie G.R., “The ventilation of London’s Underground Railway.” *2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Cambridge, 1976, p. 11-27*
10. Hu Z.H., Li X.Z., Zhao X.B., Xiao L., Wu W. “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 [https://doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60015-2](https://doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60015-2)
11. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M, Gunn M., Maidment G. “Modelling of Heat Energy Recovery Potential from Underground Railways with Nearby Vertical Ground Heat Exchangers in an Urban Environment”. *Applied Thermal Engineering*, vol. 147, 2019, pp. 1059–1069. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.118>

12. Revesz A., Chaer I., Thompson J., Mavroulidou M., Gunn M., Maidment, G. “Ground Source Heat Pumps and Their Interactions with Underground Railway Tunnels in an Urban Environment: A Review.” *Applied Thermal Engineering*, vol. 93, 2016, pp. 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.011>
13. Brandl H. “Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds.” *Procedia Engineering*, 165 (2016) 747 – 764
14. Research Project GeoTU6. GeoTU6 – a geothermal Research Project for Tunnels. https://www.tunnel-online.info/en/artikel/artikel_en_1274298.html Access date: 2 October 2023.
15. Geothermal use of tunnels. https://indico.cern.ch/event/1173667/attachments/2465651/4228155/Task%201-%20Thermal%20tunnel%20report_Issue_20220518.pdf. Accessed 5 October 2023.
16. Nicholson, D.; Chen, Q.; de Silva, M.; Winter, A.; Winterling, R. “The Design of Thermal Tunnel Energy Segments for Crossrail, UK.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 167, iss. 3, 2014, pp. 118–134. <https://doi.org/10.1680/ensu.13.00014>
17. Barla M., Di Donna A., Perino A. “Application of Energy Tunnels to an Urban Environment.” *Geothermics*, vol. 61, 2016, pp. 104–113, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>
18. Barla M.; Di Donna, A. “Energy tunnels: concept and design aspects.” *Underground Space*, vol. 3, Iss. 4, 2018, pp. 268-276, <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003>

UDC [662.997:621.176]:625.42

Post-graduate Vadym Zadiranov,
vadimharij@gmail.com, ORCID: 0009-0002-9179-9753,
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

REVIEW OF THE EXPERIENCE IN UTILISING WASTE HEAT FROM THE METRO

***Abstract.** The exhaustibility of traditional fossil energy sources is leading to the increasing use of unconventional energy sources. One of the most promising areas of alternative energy is the use of low-potential ground energy to heat buildings and structures for various purposes using a heat pump. The subway generates a significant amount of heat, especially when trains are braking, stopping on platforms and picking up speed when they start moving from the station. Thus, to combat the rise in temperature in tunnels and stations, a complex ventilation system is designed, including shafts, fans, and under-platform exhaust. In modern Ukrainian subways, the ventilation system is designed to cope with the rising temperatures in tunnels and stations. This traditional approach results in high energy consumption for running fans and ignores the possibility of using the extracted heat above ground in buildings. Techniques such as lining underground railway tunnels with heat exchanger segments, installing a heat exchanger in a subway ventilation shaft, installing geothermal heat pumps next to a subway tunnel, installing energy piles, energy baffle walls, energy platforms, and introducing absorption pipes into tunnel segments can provide an alternative solution to cool tunnels and the surrounding ground, and transfer the resulting heat to neighbouring buildings for heating. This would also have the benefit of reducing energy consumption for tunnel ventilation. This article discusses the possibility of using waste heat from underground railway systems as a source of low-potential energy to provide heat to, for example, adjacent buildings. Various technologies for utilising waste heat from underground railway tunnels that have already been implemented or whose models are technically and economically feasible are presented.*

Key words: heat pump, waste heat, heat utilization, metro, subway, energy tunnel, geothermal energy