

УДК 621.643.053

**Володимир Дерій\***, к.т.н., ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

**Ірина Соколовська**, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0003-1959-9837>

**Олександр Тесленко**, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

e-mail: [info@ienergy.kiev.ua](mailto:info@ienergy.kiev.ua)

\* Автор-кореспондент: [derii.volodymyr@gmail.com](mailto:derii.volodymyr@gmail.com)

## ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ТЕПЛОТИ ДЛЯ ТЕПЛОАСОСНИХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

**Анотація.** Розглянуто використання джерел низькопотенційної теплоти теплоасосними установками систем теплопостачання в розвинутих країнах Європи. Встановлено, що як джерела низькопотенційної теплоти для теплоасосних установок використовуються технологічні води, природні водойми, вентиляційні викиди будівель та споруд, морська вода, теплота холодильних установок, підземні води, димові гази котельні та ТЕЦ, стічні води, теплота акумуляторів сонячної енергії, геотермальна теплота. Показано, що для теплоасосних установок систем централізованого теплопостачання України найбільш доцільно використовувати теплоту: вентиляційних викидів будівель, приєднаних до цих систем, стічних вод, ґрунтів та ґрунтових вод, повітря, димових газів котельні та ТЕЦ, річок, технологічних вод, викидів та скидів промислових підприємств. Скидна вентиляційна теплота супермаркетів, торгово-розважальних центрів та метрополітенів буде використана не для систем централізованого теплопостачання, а для власних потреб цих організацій. Використання теплоти ґрунтів та ґрунтових вод не знайде широкого застосування в системах централізованого теплопостачання через щільність міських забудов.

**Ключові слова:** джерело низькопотенційної теплоти, системи централізованого теплопостачання, тепла енергія, тепловий насос.

### 1. Вступ

Теплові насоси (ТН) широко застосовують у різних сферах економіки розвинутих країн Європи – у хімічній, нафтопереробній, нафтохімічній, фармацевтичній, біохімічній, харчовій, металообробній, автомобільній, для сушіння деревини, твердих агропродовольчих та біологічних матеріалів, паперу, цегли; для комунальних потреб [1]. Для роботи ТН використовуються різноманітні джерела низькопотенційної теплоти (ДНТ) як природного, так і антропогенного походження. До природних джерел відносяться зовнішнє повітря, поверхневі води водоймищ (ріка, море, озеро), підземні води, ґрунт та гірські породи верхнього шару Землі та сонячна енергія; до джерел антропогенного походження відносяться скидні (стічні) води, повітря тепловентиляційних систем, нагріте повітря та нагріті води або інші рідини систем охолодження технологічних процесів, тощо. За даними [2], 66% відпрацьованої теплоти у промисловості є низькопотенційною, яку складно утилізувати. Загалом всі природні ДНТ для використання тепловими насосами є акумуляторами сонячної енергії, яка накопичилась у них у результаті опромінення (інсоляції) Сонцем. Енергія інсоляції (опромінення

Сонцем), яка в середньому становить 1,4 кВт/м<sup>2</sup> на добу, формує накопичення низькопотенційної теплоти у повітрі, в ґрунті безпосередньо поблизу його поверхні та у відкритих водоймах [3].

Метою роботи є обґрунтування вибору ДНТ для теплоасосних установок систем централізованого теплопостачання (СЦТ).

### 2. Методи та матеріали

ДНТ, які використовуються у теплоасосних установках (ТНУ), класифікують за ознаками носія теплової енергії, а саме: аеротермальні (газоподібний теплоносіє); геотермальні (теплоносіє є верхній шар ґрунту або гірських порід, зазвичай до 100 м глибиною); гідротермальні (теплоносіє є рідина); геліотермальні (сонячне випромінювання).

У країнах Європи для роботи ТНУ використовують аеротермальні, гідротермальні, геотермальні та техногенні джерела (скидна теплота) низькопотенційної теплоти. У разі використання скидної теплоти як ДНТ та електроенергії з відновлювальних джерел для приводів ТН створюється важливий технологічний важіль для декарбонізації теплових процесів.

Встановлено сім основних типів джерел теплоти, що використовуються великими електричними

ми ТНУ в країнах Європи для потреб теплопостачання (табл. 1). ДНТ характеризуються низкою теплотехнічних показників: доступністю, температурним потенціалом, щільністю теплового потоку та енергетичним потенціалом. У табл. 1 наведено деякі якісні характеристики ДНТ, в табл. 2 – переваги й недоліки технологій ТНУ, а також можливий їх вплив на довкілля та застереження у разі їх використання, а в табл. 3 наведено температурні характеристики основних ДНТ, тепловий потенціал та способи відбирання низькопотенційної енергії.

Зовнішнє повітря, як це видно з табл. 3, є загальнодоступним ДНТ, має широкий температурний діапазон використання, витрати на впровадження повітряних ТНУ набагато менші, ніж витрати на впровадження інших видів ТНУ. Недоліками є падіння COP зі зниженням температури зовнішнього повітря; зниження термодинамічної ефективності ТНУ внаслідок підвищення різниці температур конденсації й кипіння в зимовий період; необхідність дефростації (розморожування) випарника у разі утворення на його поверхні «крижаної шуби», що погіршує теплообмін між

**Таблиця 1.** Джерела теплоти, які використовуються в країнах Європи для ТНУ, та їхні характеристики [4]

Тип джерела теплоти	Потужність, МВт	Відсоток від загальної потужності	Кількість блоків	Середня потужність блоку, МВт	Температурний діапазон, °С	Температура	Стабільність/ безпечність	Близькість до міських районів
Стічні води	891	56%	54	17	10–20	В	В	В
Вода з навколишнього середовища	390	24%	34	11	2–15	С	В	В
Промислова відпрацьована теплота	129	8%	28	5	12–46	В	Н	С
Геотермальна теплота	97	4%	19	5	9–55	В	В	Н
Димові гази	40	2%	7	6	34–60	В	С	С
Централізоване охолодження	30	<2%	4	7	0–9	Н	С	В
Акумуляування сонячної теплоти	4	<1%	3	1	10–35	В	В	С
Всього	1580	–	149	–	0–60	–	–	–

В – висока, С – середня, Н – низька

**Таблиця 2.** Якісні характеристики теплонасосних технологій [5]

Технологія ТН	Вартість	Середній COP*)	Вплив на довкілля	Переваги	Недоліки
ТН, що використовує теплоту повітря	+	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Вплив на довкілля в холодних регіонах</li> <li>Витік холодоагенту може спричинити забруднення</li> <li>Шумове забруднення</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проблеми із забрудненням менші, ніж в інших випадках</li> <li>Просте управління</li> <li>Низька вартість обслуговування</li> <li>Високий COP</li> <li>Низьке споживання первинної енергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Обмерзання випарника</li> <li>COP залежить від температури навколишнього середовища.</li> </ul>
ТН, що використовує теплоту води	++	4,3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Може спричинити: забруднення води, осідання породи та ініціювати геологічні катастрофи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Високоєфективний</li> <li>Не впливають умови навколишнього середовища</li> <li>Може використовувати утилізовану теплоту з річок та озер</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Потрібні водойми або резервуари</li> <li>Потрібен дозвіл регулюючих органів для встановлення.</li> </ul>

Технологія ТН	Вартість	Середній COP <sup>*)</sup>	Вплив на довкілля	Переваги	Недоліки
ТН, що використовує теплоту ґрунту	+++	3,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Неконтрольовані флюїди для передачі теплоти є небезпечними</li> <li>Поверхневі води можуть потрапляти в свердловину</li> <li>Може порушити температуру підземних вод</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Високоєфективний та демонструє великий потенціал енергозбереження</li> <li>Дуже надійне джерело теплоти</li> <li>Може працювати в регіонах з екстремальною зимою</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Потрібна ретельна оцінка місцевої геології та вимог</li> <li>COP може зменшуватися протягом опалювального сезону через досягнення граничного значення температури ґрунту.</li> </ul>
Геотермальний ТН	++++	4	Зменшує викиди за низького терміну окупності	<ul style="list-style-type: none"> <li>Високий COP</li> <li>Використовує величезне джерело теплоти</li> <li>Найбільш придатний для великих галузей промисловості та централізованого теплопостачання</li> </ul>	Може знадобитися додаткова система обігріву для кращої продуктивності.
Сорбційний ТН	++++	1,8	Робочі флюїди не спричиняють руйнування озону	Утилізація відпрацьованого тепла зі стічних вод та соляного розчину	Низький COP
ТН, що використовує сонячну енергію	++ до ++++	Вище ніж COP окремого ТН	<ul style="list-style-type: none"> <li>Значні екологічні переваги</li> <li>Може зменшити викиди на 50%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Фінансово та енергетично вигідне рішення</li> <li>Сонячна енергія допомагає ТН в досягненні більш високого COP</li> <li>Зниження споживання електроенергії</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Потрібен додатковий механізм управління для оптимальної роботи</li> <li>Дуже специфічне місце розташування та застосування.</li> </ul>

<sup>\*)</sup> COP – коефіцієнт перетворення

**Таблиця 3.** Температурні характеристики ДНТ [6]

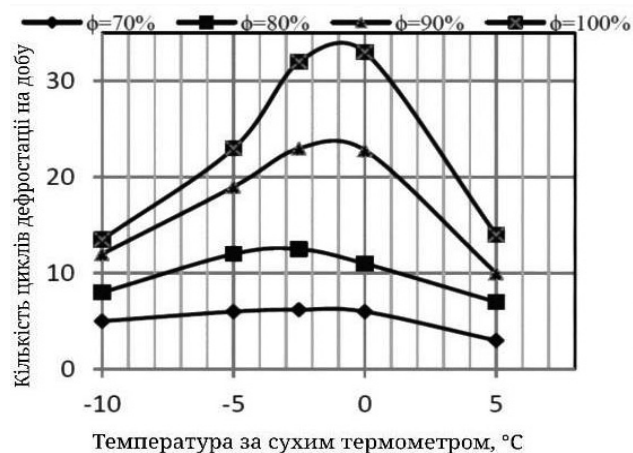
Джерело тепла	Тепловий потенціал	Температурний діапазон, °С	Спосіб відбирання низькопотенційної енергії
Зовнішнє повітря	Необмежений	-10/+15	Безпосередньо у випарник теплових насосів або з проміжним теплоносієм
Скидне використане повітря	Обмежений	15/25	—  —
Підґрунтові води	Обмежений	4/10	—  —
Озерна вода	Обмежений	0/10	—  —
Річкова вода	Обмежений	0/10	—  —
Морська вода	Обмежений	3/8	—  —
Ґрунт	Необмежений	0/10	З проміжним теплоносієм у контурі випарників
Ґрунтові води	Необмежений	>10	Безпосередньо у випарник теплових насосів або з проміжним теплоносієм
Геотермальна вода	Обмежений	20/50	—  —

повітрям і холодоагентом. Кількість необхідних циклів дефростації залежить від вологості повітря та його температури нижче 0 °С (рис. 1), максимальна кількість циклів – за температури мінус 5–0 °С. Використання повітряної ТНУ є неефек-

тивним за високої вологості та низької температури повітря [6, 7].

У книзі [8] та на сайті Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [9] розміщено інформацію щодо технічно досяжно-

го теплового потенціалу повітря по областях країни. У роботі [10] наведено інформацію щодо економічно доцільного потенціалу повітря для України в цілому, який становить 3,5 млн т у. п. на рік.



**Рис. 1.** Залежність частоти дефростації від відносної вологості  $\phi$  і температури [6, 7]

Грунтові (геотермальні) ДНТ можна використовувати за допомогою вертикальних і горизонтальних теплообмінників. На глибині близько 15 м температура ґрунту постійна протягом року [6, 11].

Розподіл температур ґрунту по глибині залежить, в основному, від типу ґрунту (пісок, глина, гравій і т.д.) і його вологості [6]. Зі збільшенням глибини динаміка зміни температури зменшується. На глибині 3,2 м зафіксовано сезонну зміну температури ґрунту в діапазоні близько 7 °С. На глибині понад 8,6 м сезонні зміни температури ґрунту від 10 °С до 12 °С, тому ґрунтови води на цій глибині є досить потужним ДНТ. Граничне нижнє значення температури ґрунту визначає, що подальший відбір тепла від ґрунту призведе до збільшення глибини промерзання його верхніх шарів, що впливає на надійність споруд над місцем розташування колектора ТН. Для регіонів України з мінімальною температурою повітря в зимовий період мінус 20 °С мінімально допустима температура ґрунту на глибині до 8 м має бути не нижче 5–7 °С [12].

Контур горизонтального колектора ТНУ, як правило, розташовують на глибині 1,2–1,5 м, тобто в зоні суттєвої зміни температури ґрунту протягом року, що впливає на продуктивність геотермальної ТНУ. Розташування колекторів на більшій глибині призводить до підвищення будівельних витрат і є ефективним для регіонів з більш холодним і тривалим зимовим періодом. Ефективність роботи горизонтальних теплообмінників залежить від типу ґрунту, його вологості та кліматичної зони. Тепловіддачу різних ґрунтів наведено в табл. 4 [6, 13, 14].

**Таблиця 4.** Тепловіддача різних ґрунтів [6]

Тип ґрунту	Питомий тепловий потік, Вт/м <sup>2</sup>
Сухий піщаний	10–15
Вологий піщаний	15–20
Сухий глинистий	20–25
Вологий глинистий	25–30
Ґрунт, насичений ґрунтовими водами	30–35

Використання вертикальних теплових зондів потребує площу земельної ділянки, меншу у 10–20 разів, ніж при використанні горизонтальних колекторів [7]. Для встановлення вертикальних теплових зондів бурять свердловин на глибину 50–200 м, самі зонди розташовують на відстані один від одного не менше 5–6 м, також можливо встановлення зондів у опори фундаментів будівель. Питомий тепловий потік залежить від типу ґрунту, Вт/м<sup>2</sup>: для піщаного сухого – 20; для піщаного вологого – 40; для кам'янистого вологого – 60; для водоносних шарів ґрунту, які містять гравій – 80–100 [6, 15, 16].

Динаміка зміни температури ґрунту на різних глибинах, а також максимальні та мінімальні значення температур ґрунту на його поверхні дозволяють визначити запаси енергії і в подальшому сформулювати вимоги до ТН. Компаніями «Атмосфера» [12] та GEOTERMO [17] наведено експлуатаційні особливості теплонасосних систем та ДНТ щодо температурної стабільності ДНТ, буріння свердловин. Теоретичні розрахунки [12] показали, що для ефективного використання ТНУ для опалення приміщень необхідним є концентрування низькопотенційної теплоти. Ґрунтови води, які, переважно, є підземними потоками, можуть бути ефективними концентраторами низькопотенційної теплоти.

На території України існують як м'які, так і тверді породи, зокрема на глибині декількох метрів у західних, центральних і деяких південних регіонах. Вартість буріння граніту в рази більша, ніж вартість буріння глини, й часто є співставною з вартістю ТН, що істотно збільшує термін окупності обладнання. У таких випадках доцільно використовувати ТН повітря–вода [17]. Саме тому їх часто встановлюють в західних регіонах.

Вода як ДНТ для ТНУ широко використовується на практиці [18].

Підземні води мають відносно незмінний тепловий потенціал, що залежить від глибини, відстані від поверхневих водотоків тощо. Наприклад, температура вод на глибині 10–15 м – 6–11 °С, на глибині 100 м – вище 10 °С [16].

Використання води з артезіанських свердловин є досить затратним через необхідність буріння свердловин та прокладки труб, проблему корозії й мінеральних відкладень на поверхні теплообмінників [18].

Відкриті водойми (озера, річки і моря) є надійним ДНТ, причому озера й річки вважають місцевими ДНТ. У разі їх використання необхідно брати до уваги сезонну мінливість обсягів, чистоти і температурних режимів водних ресурсів, а також враховувати вплив на довкілля [16, 18]. В Україні є шість основних річок, на берегах яких розташовані великі міста з наявною системою централізованого теплопостачання: р. Дніпро (міста – Київ, Черкаси, Дніпро, Запоріжжя, Херсон), р. Дністер (міста Старий Самбір, Рибниця, Дрогобич), р. Південний Буг (міста – Хмельницький, Вінниця, Миколаїв), р. Сіверський Донець (міста Чугуїв, Ізюм, Лисичанськ, Святогорськ, Северодонецьк) та прикордонна р. Дунай (міста – порти Ізмаїл та Рені). Теплоенергетичний потенціал річок визначається двома основними чинниками: температурою води та її витратою. Теоретичний теплоенергетичний потенціал води річок дорівнює кількості теплоти, яку можна отримати під час охолодження її річного стоку від середньорічної температури до нуля градусів Цельсія (без урахування теплоти фазового переходу під час замерзання (кристалізації) води).

Використання теплових насосів для утилізації скидної антропогенної теплоти в містах на сьогодні є перспективним напрямком щодо зниження негативного впливу на довкілля та збільшення енергоефективності. Основними джерелами ДНТ у містах є системи вентиляції та кондиціонування житлових будинків, супермаркетів, центрів обробки даних, тунелів електричних кабелів, метрополітенів. Крім того, можна використовувати скидну теплоту систем охолодження електричних підстанцій, промислових установок та каналізаційних стоків.

Стічні води є перспективним ДНТ, але мало використовується через їх біологічну та корозійну агресивність і нерівномірне надходження в каналізаційну мережу. Використання стічних вод передбачає також їх попереднє розділення з урахуванням температурних та хімічних показників, а також встановлення баків-акумуляторів для згладжування пікових навантажень під час споживання, наприклад, гарячої води. В теплообмінниках-утилізаторах допускається зниження температури стічних вод до значення, за якого температура змішаних стічних вод під час їх надходження на очисні споруди буде не нижче, ніж значення, встановлені регламентами [16, 18].

У разі підземних вод, відкритих водойм і стічних вод низькопотенційна теплота відбирається

безпосередньо у випарниках ТН або з проміжним теплоносієм [16].

Використана гаряча вода є цінним ДНТ. Її температура зимою становить близько 12 °С, а в літній період – 20 °С. В українських містах стічні води утворюються у величезній кількості. Так, наприклад, кожної доби в місті Києві утворюється понад 1,4 млн м<sup>3</sup>, в Одесі – 400 тис. м<sup>3</sup>, у Вінниці 110 тис. м<sup>3</sup>. У цілому по Україні – понад 10 млн м<sup>3</sup> за добу [19]. Енергетичний потенціал стічних вод України був досконало досліджений у [20], зокрема визначено економічно доцільний потенціал теплової енергії стічних вод – 12726 МВт·год/рік.

Як відомо, втрати теплової енергії в житлових, громадських та адміністративних будівлях через системи вентиляції можуть становити до 25% від загального обсягу споживання ними теплової енергії [21]. Тому скидна теплота систем вентиляції будівель може бути одним із ДНТ для ТНУ, аналогічно, як і скидна низькопотенційна тепловова енергія супермаркетів та торговельно-розважальних комплексів. Але слід зазначити, що переважна більшість супермаркетів та торговельно-розважальних центрів мають власні системи опалення та постачання гарячої води. Окрім того, згідно з ДБН В.2.5-67:2013 системи опалення, вентиляції та кондиціонування слід проектувати з використанням теплоти вторинних енергетичних ресурсів, таких як повітря, що видаляють системи загальнообмінної вентиляції, кондиціонування повітря та місцевими відсмоктувачами. Для досягнення показників питомих тепловитрат у системах механічної загальнообмінної вентиляції та системах кондиціонування повітря, згідно з ДБН В.2.6-31, рекомендується застосовувати теплоутилізацію. Тож у багатьох супермаркетах та торговельно-розважальних центрах уже встановлені теплоутилізатори, які інтегровані в їх системи опалення та постачання гарячої води. Решта потенціалу скидної низькопотенційної вентиляційної теплоти супермаркетів та торговельно-розважальних комплексів, скоріше за все, буде використана ними для власних потреб, а не СЦТ.

#### Низькопотенційна теплота метрополітенів

У ряді останніх досліджень аналізувався потенціал утилізації відпрацьованої теплоти із залізничних тунелів, зосереджуючи увагу на різних технологіях, які можуть бути застосовані для ефективного отримання енергії, що розсіюється у вигляді теплоти під час роботи підземних поїздів [22]. У підземних тунелях метро збирається теплота, що виділяється поїздами, пасажирами та електронікою [23]. За даними авторів [24], на кінець 2017 р. 178 міст у 56 країнах світу мали системи метрополітену, які перевозили в середньому 168 мільйонів пасажирів на день. З 2012 по

2017 рік щорічне обслуговування міських залізничних систем зросло на 19,5%. За прогнозами ці транспортні системи зростатимуть з збільшенням міського населення у всьому світі, особливо в мегаполісах країн, що розвиваються.

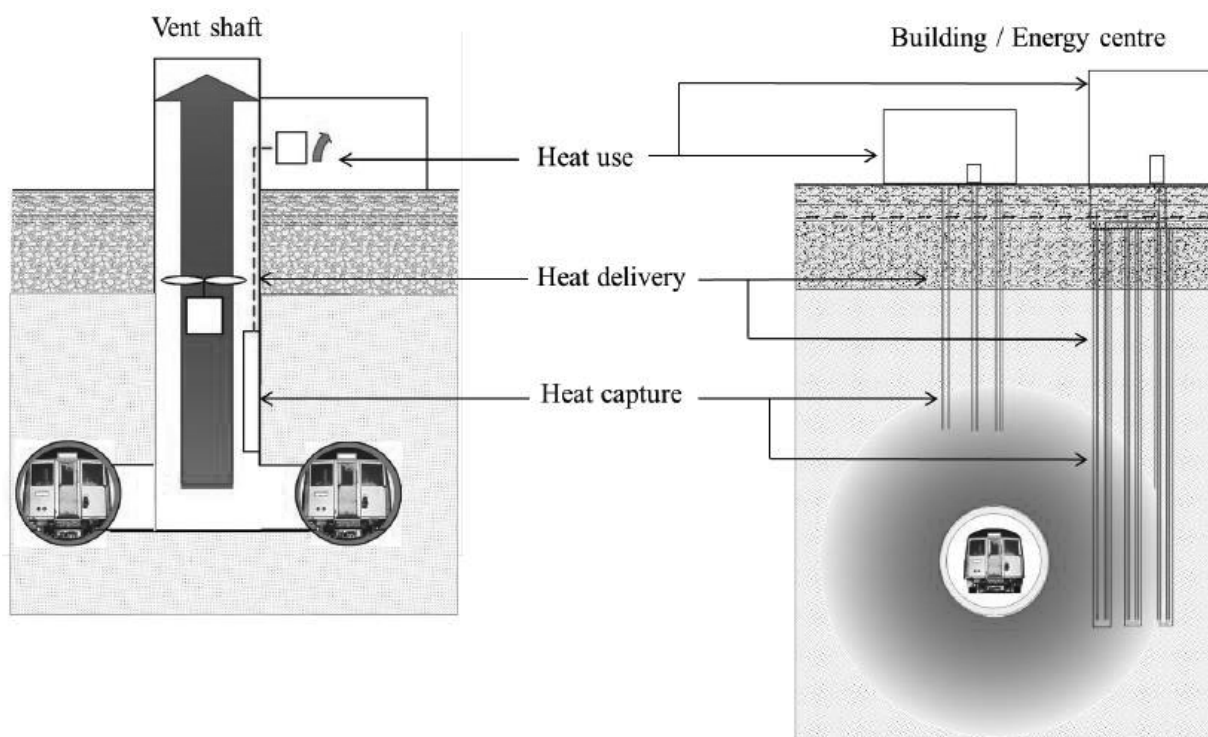
У роботі [25] обґрунтовано доцільність застосування теплових насосів для використання теплоти метро для опалення та охолодження будівель протягом року та описано відповідні математичні моделі. Зокрема, зазначено, що в тунелях температура повітря може досягати  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  і більше, а температура ґрунту –  $20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 2 показано схеми утилізації теплоти з тунелів, платформ та ґрунту, що оточує тунелі.

Короткий зміст низки досліджених технологій, які передбачають утилізацію відпрацьованої теплоти з підземних залізничних тунелів, представлено в табл. 5 [22], у роботі [26] обґрунтовано та докладно описано принципи проектування систем для використання теплоти тунелів.

У Федеральній політехнічній школі Лозанни (Швейцарія) точно розрахували коефіцієнт конвективного теплообміну окремих тунелів, завдяки чому розробили геотермальну систему рекуперації теплоти, для чого в стінки тунелю вбудовують пластикові труби з теплоносієм, наприклад, звичайною водою. Холодний теплоносій проходить по трубах, нагрівається теплотою тунелю і виходить на поверхню, де потрапляє в

систему опалення будівель. Цю систему можна використовувати для обігрівання або охолодження будинків поблизу метро. Як показали тести, 60 тис.  $\text{m}^2$  тунелів виділяють енергію, достатню для опалення 1500 квартир площею  $80\text{ m}^2$ . Такі системи є дешевими, легко встановлюються і можуть служити до 100 років, тільки ТН потрібно міняти кожні 25 років [23].

Мережа Bunhill 2 є першим практичним проектом у Європі зі застосування відпрацьованої теплоти метро для централізованого теплозабезпечення 500 будинків району Іслінгтон, Лондон [22, 27, 28]. Центральним джерелом Bunhill 2 є вентиляційна шахта, яка використовується для відводу відпрацьованої теплоти, на покинутій станції метро City Road. ТН Ramboll ( $1\text{ MWt}$ ,  $\text{COP} = 3$ ) вловлює цю надлишкову теплоту ( $18\text{--}28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і підвищує її температуру до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  для подачі тепла і гарячої води в будинки. Разом з тепловим насосом розташовані два  $237\text{ kWt}$  когенераційні газові двигуни, які постачають електроенергію для ТН та електромережі, що покращує технічні та економічні показники системи. У схемі також реалізований теплоаккумулятор. Система спроектована так, що в літні місяці можна направляти холодне повітря в тунелі метро [27, 28]. Впровадження такої системи дає суттєве зниження навантаження на доквілля, а також можливість стабілізації теплового режиму і параметрів внутрішнього мі-



**Рис. 2.** Утилізація теплоти з тунелів та платформ (ліворуч) та рекуперація теплоти з ґрунту (праворуч) [25]

**Таблиця 5.** Потенційні технології утилізації відпрацьованої теплоти з підземних залізничних тунелів [22]

Технологія	Розташування	Джерело теплоти	Температура джерела теплоти, °С	Швидкість відбору теплоти	Рівень переривання обслуговування
Ґрунтові води, що використовуються в повітряних кондиціонерах платформ	Лондон, Велика Британія	Повітря	22–32	50 кВт/од.	Середній
Стіни з розміщеними в них елементами геотермального обігріву	Відень, Австрія	Повітря/ґрунт	>20	30 Вт/м <sup>2</sup> площі контакту з землею	Високий
Фундаменти та підземні споруди	Відень, Австрія	Ґрунт	>20	10–30 Вт/м <sup>2</sup> площі контакту з землею	Високий
Абсорбційні труби, прикріплені до геотекстилю між обмуруваннями тунелів	Штутгарт, Німеччина	Повітря	6,5	20 Вт/м <sup>2</sup> площі поверхні тунелю	Високий
Вбудовані абсорбційні труби в сегментах тунелів	Лондон, Великобританія	Повітря	17–36	від 7 Вт/м <sup>2</sup> до 30 Вт/м <sup>2</sup> площі поверхні тунелю	Високий
	Турін, Італія	Повітря/ґрунт	14	53 Вт/м <sup>2</sup> площі поверхні тунелю	Високий
Геотермальні теплові насоси біля тунелів	Лондон, Великобританія	Ґрунт	20–30	від 20 до 29 Вт/м довжини свердловини	Низький
Теплообмінники у вентиляційних шахтах	Лондон, Великобританія	Повітря	20–28	900 кВт/вал	Низький

кроклімату на станціях і в вестибюлях метрополітену [27–29]. За даними адміністрації Великого Лондона, 38% потреб міста в опаленні можна задовольнити завдяки використанню відпрацьованої теплоти. До 2050 р. розширення таких мереж СЦТ, як Bunhill 2, може призвести до збільшення цього значення до 63% [27].

У Мінську 44 ТН опалюють 22 станції метрополітену з 29 діючих. Сумарна теплова потужність встановлених ТН понад 700 кВт. Усі нововведені станції метрополітену з 2001 р. (9 станцій) проєктуються з системами автономного теплопостачання на базі ТН, які складаються з двох теплових пунктів, розміщених у протилежних вестибюлях, в кожному з яких встановлений ТН як основне джерело теплової енергії. Розрахункова температура теплоносія в контурі конденсатора 55/50 °С, у системі опалення теплопостачання здійснюється за постійним температурним графіком 55/45 °С (незалежно від температури зовнішнього повітря). Резервним джерелом теплопостачання є електрокотел [30].

У Києві ще у 2000 р співробітниками ІТТФ НАНУ було розроблено і впроваджено технологіч-

ну схему утилізації надлишкового тепловиділення машинного залу ескалаторів за допомогою парокompресійної ТНУ «повітря-повітря» TADIBAN «SKY-90». Розрахункова річна економія від зниження споживання метрополітеном енергії від тепломережі на станції «Майдан Незалежності» в м. Києві становить 17 т у.т. [31]. На станції метро «Берестейська» встановлено тепловий насос «повітря-вода» СН-HP28CMFNM потужністю 28 кВт (COP 3,8) для опалення та гарячого водопостачання [32, 33].

Скоріше за все використання низькопотенційної теплоти метрополітенів в Україні буде аналогічно мінському варіанту – для їх власних потреб.

Відпрацьована теплота енергоємних галузей промисловості, таких як виробництво сталі, цементу, паперу, скла, хімікатів тощо, являє собою поєднання високих температур димових газів, безперервної роботи та висококонцентрованих точкових джерел і є дуже привабливим джерелом для централізованого опалення, хоча в даний час використовується рідко, а його основний потенціал витрачається даремно. За даними [34] в Європі загальний потенціал надлишкової теплоти стано-

виль 425 ПДж, доступного за температури 95 °С, і 960 ПДж, доступного за нижчої температури (25 °С), що становить приблизно 4 та 9% загального промислового попиту на кінцеву енергію у 2015 р. відповідно. 151 ПДж надлишкової теплоти можна використати в межах 10 км за температури 95 °С, що відповідає більшості існуючих СЦТ і становить близько 8% централізованого опалення в ЄС. У майбутньому прогнозується використання 415 ПДж теплоти за 95 °С і 940 ПДж за 25 °С, що може бути використано або в СЦТ з децентралізованими ТН, або в централізованих потужних ТН для забезпечення СЦТ за більш високих температур.

Одним із доступних ДНТ для СЦТ можуть бути димові гази власних котелень та ТЕЦ. Під час вироблення теплової енергії 5–10% її втрачається з димовими газами [35, 36], що може бути використано ТНУ.

Наведемо декілька прикладів практично використовуваних ДНТ потужними ТНУ в різних секторах економіки Європи [37, 38]:

1. Системи централізованого теплопостачання: у м. Берггайм (Німеччина) два ТН по 293 кВт використовують теплоту скидної води після градириної електростанції і один ТН 865 кВт – теплоту відвідної води з шахти; у м. Мянтя-Вільпула (Фінляндія) для ТН 158 кВт та у Відні (Австрія) для ТН 255 кВт джерелом теплоти є зворотний трубопровід СЦТ; відпрацьована теплота – з центру обробки даних для ТН 3,6 МВт у м. Мянцяля (Фінляндія), з паперової фабрики для ТН 5,3 МВт у м. Ск'єрн (Данія), з підприємства харчової промисловості для ТН 7–4 МВт (зима/літо) у м. Лілль-Скенсвед (Данія); теплота морської води – для ТН 13,2 МВт у муніципалітеті Драммен (Норвегія) та для ТН 16 МВт у Форнебу/Рольфсбукта (Норвегія); вода озера Леман є джерелом теплоти для ТН 4,5 МВт в Лозанні (Швейцарія); енергію стічних вод каналізації використовують два ТН (потужність нагрівання – 1,69 МВт, потужність охолодження – 1,748 МВт) для забезпечення ЦТ Уйпешта, району Будапешта з більш ніж 100 000 жителів.

2. Опалення та охолодження будівель: у Будапешті (Угорщина) ТНУ використовує стічні води каналізації та забезпечує 3,8 МВт опалення й 3,3 МВт охолодження частини великого військового госпіталю НАТО; в Баварії (Німеччина) ТН 198 кВт використовує енергію від пофарбованих в чорний колір бетонних стін; відхідну теплоту системи охолодження обчислювального центру використовують у м. Гамбург (Німеччина) два ТН по 360 кВт для обігрівання 13-поверхової будівлі, а в Університеті Бургундії, м. Діжон (Франція) ТН 420 кВт для охолодження центру обробки даних, опалення будинків взимку, влітку тепло для вироблення гарячої води для кухонь університетського ресторану

та ін.; в аеропорту Копенгагена (Данія) ТН 620 кВт використовує теплоту димових газів газового котла; у м. Гадебуш (Німеччина) два ТН по 300 кВт живляться технологічною теплою, що постійно надходить від обладнання для оброблення металів, для опалення п'яти залів площею 13 700 м<sup>2</sup>

3. Технологічні процеси: на м'ясокомбінаті Colruyt Group (Бельгія) ТН 1 МВт використовує теплове навантаження від існуючого промислового холодильного машинного відділення для виробництва гарячої води; у Пішельсдорфі (Австрія) ТН 400 кВт інтегрований у процес сушіння крохмалю, утилізуючи відпрацьовану теплоту від інших процесів сушіння; в Уттендорфі (Австрія) високотемпературний ТН 400 кВт використовує відпрацьовану теплоту для забезпечення гарячого повітря для сушарки цегли; на фабриці ДСП швейцарської компанії Swiss Krono (Німеччина) відпрацьована пара електростанції використовується як джерело енергії для двох ТН по 4,51 МВт для забезпечення гарячою водою, яка використовується для попереднього висушування деревної тріски.

#### 4. Гібридні системи:

- в Мілані (Італія) два ТН по 850 кВт, для яких джерелом теплоти є підземні води, забезпечують теплом мережу ЦТ і одночасно знижують надмірно високий рівень ґрунтових вод;

- компанія Nutrex застосовує ТН 194 кВт на виробництві оцту, яке складається з процесів бродіння та пастеризації, ці два процеси є джерелом і поглиначем теплоти, а також забезпечує опалення лабораторії та будівлі;

- в Лемпяля (Фінляндія) на заводі хімічних речовин впроваджено інтелектуальну гібридну систему, в якій застосовано ТН 650 кВт, що використовує відпрацьовану теплоту, що відбирається в процесі полімеризації, для нагрівання води та опалення заводу і геотермальну теплоту (130 кВт) для опалення та охолодження;

- у Вегелі (Нідерланди) на шоколадній фабриці MARS Nederland ТН 1,4 МВт використовує відпрацьовану теплоту з холодильної установки для нагрівання води, яка надходить різним процесам і користувачам на підприємстві, а також у кондиціонери;

- у машинобудівному виробництві Völbach ТНУ (потужність нагрівання – 107 кВт, потужність охолодження – 84 кВт) використовуються на виробничих потужностях для повторного використання відпрацьованої теплоти від виробничих машин та опалення в офісному комплексі;

- у м. Каухава (Фінляндія) ТН 600 кВт використовує відпрацьовану теплоту фарбувального цеху для нагрівання технологічної води, промивної води фарбувальних ліній, осушення повітря в фарбувальному цеху (що дуже важливо для термінів ре-



алізації продукції і є додатковою цінністю системи повторного використання відпрацьованої теплоти), а також подачі повітря та води до будівлі;

- у м. Піетарсаарі (Фінляндія) на м'ясокомбінаті рекуперації цієї відпрацьованої теплоти та для нагрівання промивної води до +55 °С. Встановлено ТН потужністю 1,09 МВт, які використовують теплоту від охолоджувальних машин для нагрівання промивної води до +55 °С, для обігріву комбінату до +75 °С, для стерилізації ножів та інших інструментів +95 °С, також теплота використовується для сушіння приміщень після миття;

- у сільськогосподарському процесі (Словенія) ТН 2,0 МВт використовує геотермальну енергію для опалення теплиць та охолодження сховища.

### 3. Результати

Проведені дослідження показали, що ДНТ для теплонасосних установок є технологічні води, природні водойми, вентиляційні викиди будівель та споруд, морська вода, теплота холодильних установок, підземні води, димові гази котелень та ТЕЦ, стічні води, теплота акумуляторів сонячної енергії, геотермальна теплота. Як показано на наведених вище прикладах, зазначені ДНТ використовуються ТНУ в різних секторах економіки європейських країн.

### 4. Обговорення результатів

Аналіз ДНТ показав, що скидна вентиляційна теплота супермаркетів, торгово-розважальних центрів та метрополітенів буде використана не для СЦТ, а для власних потреб цих організацій. Через щільність міської забудови використання теплоти ґрунтів та ґрунтових вод для ТНУ СЦТ буде обмеженим. В ТНУ СЦТ України найбільш доцільним буде використання вентиляційних викидів будівель, приєднаних до цих систем, стічних вод, повітря, димових газів котелень та ТЕЦ, річок, технологічних вод, викидів та скидів промислових підприємств.

### 5. Висновки

Проведені дослідження показали, що в розвинутих країнах Європи в якості джерел низькопотенційної теплоти для теплонасосних установок використовуються технологічні води, природні водойми, вентиляційні викиди будівель та споруд, морська вода, теплота холодильних установок, підземні води, димові гази котелень та ТЕЦ, стічні води, теплота акумуляторів сонячної енергії, геотермальна теплота.

Показано, що для теплонасосних установок систем централізованого тепlopостачання України найбільш доцільно використовувати теплоту: вентиляційних викидів будівель, приєднаних до цих систем, стічних вод, ґрунтів та ґрунтових вод, повітря, димових газів котелень та ТЕЦ, річок,

технологічних вод, викидів та скидів промислових підприємств.

Скидна вентиляційна теплота супермаркетів, торгово-розважальних центрів та метрополітенів буде використана не для систем централізованого тепlopостачання, а для власних потреб цих організацій.

Використання теплоти ґрунтів та ґрунтових вод не знайде широкого застосування в системах централізованого тепlopостачання через щільність міських забудов.

### Посилання

- Schlosser F., Jesper M., Vogelsang J., Walmsley T.G., Arpagaus C., Hesselbach J., 2020. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 133(C). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219>.
- Low-grade waste heat utilization in the European Union. URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/CE-HEAT/Low-grade-waste-heat-utilization-in-the-European-Union.html> (дата звернення: 18.02.2022).
- Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
- David A., Mathiesen B.V., Averfalk H., Werner S., Lund H. Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. *Energies*, 2017, 10, 578. <https://doi.org/10.3390/en10040578>. URL: [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies) (дата звернення: 15.02.2022).
- Gaur A.S., Fitiwia D.Z., Curtisa J. Heat Pumps and Their Role in Decarbonising Heating Sector: A Comprehensive Review. *Working Paper*, No. 627, June 2019. URL: [http://aei.pitt.edu/102238/1/WP627\\_0.pdf](http://aei.pitt.edu/102238/1/WP627_0.pdf) (дата звернення: 16.02.2022).
- Стоянов П.Ф. Аналіз характеристик теплонасосних установок. *Холодильна техніка та технологія*. 2015. № 2(51). С. 53—58. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.2/2015.39292>
- Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: пер. с англ./М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
- Кудря С.О. Потенціал розвитку нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро- харчових та інших малих та середніх підприємствах (МСП) України. Агентство ООН з питань промислового розвитку. Київ, 2015. 48 с.
- Енергія довкілля. Сайт Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України. URL : <https://saee.gov.ua/ae/termo-energy> (дата звернення: 05.06.2021).
- Снежкін Ю.Ф. Енергоефективні теплонасосні технології: стан та перспективи їх впровадження в Україні. *Промышленная теплотехника*. 2017. Т. 39, № 2. С. 18—24.
- Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор. *Справочник промышленного оборудования*. 2004. № 2. С. 47—80.

12. Компанія Атмосфера. Сфери застосування теплових насосів. *Сайт Атмосфера™*. URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/teplovi-nasosi/sferizastosuvannya-teplovix-nasosiv/> (дата звернення: 15.02.2022).
13. Руководство по проектированию. Тепловые насосы. *Viessmann Werke GmbH & Co.* 2011. 125 с.
14. Морозов Ю.П., Величко В.В., Кушнір І.О. Оцінка теплового потенціалу верхніх шарів Землі на території України. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 4(55). С. 84—92. <https://doi.org/10.36296/1819-8058>.
15. Морозов Ю.П., Барило А.А., Чалаєв Д.М., Добровольський М.П. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2(57). С. 70—78. <https://doi.org/10.36296/1819-8058>.
16. Жидович И.С. Применение тепловых насосов в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения многоквартирного жилого фонда на принципах энергосбережения. Минск, 2014. 32 с. URL: <https://heatpumpjournal.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/primenenie-tn-v-sisteme-teplosnabzhenija.pdf> (дата звернення: 29.04.2021).
17. Компанія GEOTEPLO. Потенціал теплових насосів великої потужності. *Сайт GEOTEPLO*. URL: <http://www.geoteplo.com.ua/ua/katalog/teplovie-nasosi-about/144-promislovi-teplovi-nasosi.html> (дата звернення: 16.02.2022).
18. Кожушко О.Д., Кізеєв М.Д. Утилізація теплової енергії стічних вод та питної води в системах водопостачання і каналізації населених пунктів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. № 7. С. 96—100.
19. Уланов Н.М., Уланов М. М. Использование низькопотенціального тепла вод различного происхождения для теплоснабжения в ЖКХ и других отраслях экономики Украины. URL: [http://www.journal.esco.co.ua/2012\\_8/art190.htm](http://www.journal.esco.co.ua/2012_8/art190.htm) (дата звернення: 05.05.2015).
20. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії/ під заг. ред. А.К. Шидловського. Київ: Українські енциклопедичні знання, 2007. 560 с.
21. Про необхідність впровадження енергоефективних заходів. URL: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/pro-neobhidnist-vprovadzhennya-energoefektyvnyh-zahodiv-rozysnennya-minregionu/> (дата звернення: 04.06.2021).
22. Lagoeiro H., Revesz A., Davies G., Maidment G., Curry D., Faulks G., Murawa M. Opportunities for Integrating Underground Railways into Low Carbon Urban Energy Networks: A Review. *Applied Sciences*, 2019, 9, 3332. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> (дата звернення: 04.05.2021).
23. Мешкаєте поблизу метро? Ваш будинок можна опалювати з-під землі. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-48990139> (дата звернення: 04.05.2021).
24. International Association of Public Transport (UITP). World Metro Figures 2018. 2018. URL: <https://www.uitp.org/world-metro-figures-2018> (accessed on 6 June 2019) (дата звернення: 05.05.2021).
25. 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. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/227104882.pdf> (дата звернення: 23.04.2021).
26. Heinz Brandl. Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds. *Procedia Engineering* 165 (2016), P. 747—764.
27. Отработанное тепло от лондонского метро согреет сотни домов этой зимой. URL: <https://www.vzavtra.net/stroitelnye-tehnologii/otrabotannoe-teplo-ot-londonskogo-metro-sogreet-sotni-domov-etoj-zimoj.html> (дата звернення: 23.04.2021).
28. Bunhill Heat and Power Islington. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2019/07/bunhill-heat-and-power.pdf> (дата звернення: 13.04.2021).
29. Васильев Г.П., Горнов В.Ф., Шапкин П.В., Попов М.И., Бурмистров А.А. Теплонасосные системы теплохладоснабжения объектов Московского метрополитена. АВОК № 2'2018. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6859](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6859) (дата звернення: 07.05.2021).
30. Модернизация системы теплоснабжения Минского метрополитена с внедрением тепловых насосов. *Метро info*. 2019. № 2. С. 16—18. URL: [http://www.asmetro.ru/upload/magazin/metro\\_0219.pdf](http://www.asmetro.ru/upload/magazin/metro_0219.pdf) (дата звернення: 06.05.2021).
31. Харлампиди Д.Х., Тарасова В.А. К вопросу применения воздушного теплонасосного цикла Брайтона для систем теплохладоснабжения станций метрополитенов. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 04(98). С. 40—48.
32. Тепловой насос СН-HP28CMFNM на ст. метро Берестейская в Киеве. URL: <https://teplomir.com.ua/pf49387-teplovoj-nasos-hp28cmfnm.html> (дата звернення: 04.05.2021).
33. Тепловой насос Cooper&Hunter СН-HP28CMFNM 28 кВт. URL: <https://ek.ua/COOPER-HUNTER-CH-HP28CMFNM.htm> (дата звернення: 29.04.2021).
34. Excess heat potentials of industrial sites in Europe. URL: <https://www.seenergies.eu/2020/06/03/excess-heat-potentials-of-industrial-sites-in-europe/> (дата звернення: 29.04.2021).
35. Білодід В.Д. Оцінка можливостей підвищення енергетичної ефективності ТЕЦ шляхом використання теплонасосних установок. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 2(41). С. 48—56. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.048>.
36. Kulyk M.M., Bilodid V.D. Operational conditions of combined heat-and-power plants with heat pumps and the attainable utilization capacities of heat pumps at such plants in the Integrated Power System of Ukraine. *The Problems of General Energy*. 2014. Issue 1(36). P. 33—38.
37. Large scale heat pumps in Europe. URL: <https://planenergi.eu/activities/district-heating/heat-pumps/>
38. Large scale heat pumps in Europe – 2nd edition. URL: <https://dryficiency.eu/allgemein/large-scale-heat-pumps-in-europe-2nd-edition/> (дата звернення: 29.04.2021).

## OVERVIEW OF LOW GRADE HEAT SOURCES FOR HEAT PUMP PLANTS IN DISTRICT HEATING SYSTEMS

**Volodymyr Derii\***, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>

**Irina Sokolovska**, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-1959-9837>

**Oleksandr Teslenko**, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

Institute of General Energy of NAS of Ukraine, 172, Antonovych Str., Kyiv, 03150, Ukraine;

e-mail: [info@ienenergy.kiev.ua](mailto:info@ienenergy.kiev.ua)

\* Corresponding author: [derii.volodymyr@gmail.com](mailto:derii.volodymyr@gmail.com)

**Abstract.** *The use of low grade heat sources by heat pump plants in heat supply systems in developed European countries is considered. It is established that process waters, natural reservoirs, ventilation emissions of buildings, sea water, heat of refrigeration units, groundwater, flue gases of boilers and thermal power plants, wastewater, heat of solar energy batteries, geothermal heat are used as low grade heat sources for heat pump plants. It is shown that for heat pump plants of district heating systems in Ukraine it is most expedient to use the heat of: ventilation emissions of buildings connected to these systems, wastewater, soils and groundwater, air, flue gases of boilers and CHP, rivers, process water, emissions and discharges of industrial enterprises. Exhaust ventilation heat of supermarkets, shopping malls and subways will be used not for district heating systems, but for the own needs of these organizations. The use of the heat of soils and groundwater will not be widely used in district heating systems due to the density of urban buildings*

**Keywords:** low grade heat source, district heating systems, thermal energy, heat pump.

### References

- Schlosser, F., Jesper, M., Vogelsang, J., Walmsley, T.G., Arpagaus, C., & Hesselbach, J. (2020). Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 133(C). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219>.
- Low-grade waste heat utilization in the European Union. URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/CE-HEAT/Low-grade-waste-heat-utilization-in-the-European-Union.html> (Last accessed: 18.02.2022).
- Kudria, S.O. (2012). *Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii: pidruchnyk*. K.: NTUU «KPI», 492 c. [in Ukrainian].
- David, A., Mathiesen, B.V., Averbalk, H., Werner, S., & Lund, H. (2017). Heat Roadmap Europe: Large-Scale Electric Heat Pumps in District Heating Systems. *Energies*, 10, 578. <https://doi.org/10.3390/en10040578>. URL: [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies) (Last accessed: 15.02.2022).
- Gaur, A.S., Fitiwia, D.Z., Curtisa, J. (June 2019). Heat Pumps and Their Role in Decarbonising Heating Sector: A Comprehensive Review. *Working Paper*, 627. URL: [http://aei.pitt.edu/102238/1/WP627\\_0.pdf](http://aei.pitt.edu/102238/1/WP627_0.pdf) (Last accessed: 16.02.2022).
- Stoianov, P.F. (2015). Analiz kharakterystyk teplonasosnykh ustanovok. *Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia*, 2(51), 53—58. [in Russian]. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.2/2015.39292>
- Rey, D., & Makmaykl, D. (1982). *Teplovyye nasosy: per. s angl. M.: Energoizdat*. 1982. 224 p. [in Russian].
- Kudria, S.O. (2015). Potentsial rozvytku netradytsiinykh i vidnovliuvanykh dzherel enerhii. *Pidvyschenia enerhoefektyvnosti ta stymulivannia vykorystannia vidnovliuvanoi enerhii v ahro- kharchovykh ta inshykh malykh ta serednykh pidpriemstvakh (MSP) Ukrainy*. Ahentstvo OON z pytan promyslovoho rozvytku. Kyiv. 48 p. [in Ukrainian].
- Enerhiia dovkillia. Sait Derzhavnogo ahentstva z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. URL : <https://sae.gov.ua/ae/termo-energy> (Last accessed: 05.06.2021) [in Ukrainian].
- Sniezhkin, Yu.F. (2017). Enerhoefektyvni teplonasosni tekhnolohii: stan ta perspektyvy yikh vprovadzhennia v Ukraini. *Promyshlennaya teplotekhnika*, Vol. 39, No. 2. P. 18—24 [in Ukrainian].
- Gorshkov, V.G. (2004). *Teplovyye nasosy. Analiticheskiy obzor. Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya*, 2, 47-80 [in Russian].
- Kompaniia Atmosfera. Sfery zastosuvannia teplovykh nasosiv. *Sait Atmosfera™*. URL: <https://www.atmosfera.ua/uk/teplovi-nasosi/sferi-zastosuvannya-teplovix-nasosiv/> (Last accessed: 15.02.2022)..
- Rukovodstvo po proyektirovaniyu. *Teplovyye nasosy*. (2011). *Viessmann Werke GmbH & Co*, 125 p. [in Russian].
- Morozov, Yu.P., Velychko, V.V., & Kushnir, I.O. (2018). Otsinka teplovoho potentsialu verkhnykh shariv Zemli na terytorii Ukrainy. *Vidnovliuvana en-*

- erhetyka*, 4(55), 84—92 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2018.4\(55\).84-92](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2018.4(55).84-92)
15. Morozov, Yu.P., Barylo, A.A., Chalaiev, D.M., & Dobrovolskyi, M.P. (2019). Enerhetychna efektyvnist vykorystannia pershykh vid povorkhni vodonosnykh horyzontiv dlia teplo- i khladopostachannia. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 2(57), 70—78 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
16. Zhidovich, I.S. (2014). Primeneniye teplovykh nasosov v sistemakh teplosnabzheniya i goryachego vodosnabzheniya mnogokvartirnogo zhilogo fonda na printsipakh energosberezheniya. Minsk. 32 p. URL: <https://heatpumpjournal.com.ua/wp-content/uploads/2018/04/primenenie-tn-v-sisteme-teplosnabzheniya.pdf> (Last accessed: 29.04.2021) [in Russian].
17. Kompaniia GEOTEPLo. Potentsial teplovykh nasosiv velykoi potuzhnosti. *Sait GEOTEPLo*. URL: <http://www.geoteplo.com.ua/ua/katalog/teplovie-nasosi-about/144-promislovi-teplovi-nasosi.html> (Last accessed: 16.02.2022) [in Ukrainian].
18. Kozhushko, O.D., & Kizieiev, M.D. (2017). Utylizatsiia teplovoi enerhii stichnykh vod ta pytnoi vody v sistemakh vodopostachannia i kanalizatsii naselenykh punktiv. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*, 7, 96—100 [in Ukrainian].
19. Ulanov, N.M., & Ulanov M.M.(2012). Ispolzovaniye nizkopotentsialnogo tepla vod razlichnogo proiskhozhdeniya dlia teplosnabzheniya v ZhKKh i drugikh otraslyakh ekonomiki Ukrainy. URL: [http://www.journal.esco.co.ua/2012\\_8/art190.htm](http://www.journal.esco.co.ua/2012_8/art190.htm) (Last accessed: 05.05.2015) [in Russian].
20. Shydlovskiy, A.K. (Ed.). (2007). Enerhoefektyvnist ta vidnovliuvalni dzhherela enerhii. Kyiv: Ukrainski entsyklopedychni znannia, 560 p. [in Ukrainian].
21. Pro neobkhdnist vprovadzhennia enerhoefektyvnykh zakhodiv. URL: <https://www.minregion.gov.ua/press/news/pro-neobkhdnist-vprovadzhennya-energoefektyvnyh-zahodiv-rozysnennya-minregionu/> (Last accessed: 04.06.2021) [in Ukrainian].
22. Lagoeiro, H., Revesz, A., Davies, G., Maidment, G., Curry, D., Faulks, G., & Murawa, M. (2019). Opportunities for Integrating Underground Railways into Low Carbon Urban Energy Networks: A Review. *Applied Sciences*, 9, 3332. URL: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> (Last accessed: 04.05.2021).
23. Meshkaiete poblyzu metro? Vash budynok mozha opaliuvaty z-pid zemli. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-48990139> (Last accessed: 04.05.2021) [in Ukrainian].
24. International Association of Pubic Transport (UITP). World Metro Figures 2018. 2018. URL: <https://www.uitp.org/world-metro-figures-2018> (accessed on 6 June 2019) (Last accessed: 05.05.2021).
25. Revesz, A., Chaer, I., Thompson, J., Mavroulidou, M., Gunn, M., & Maidment, G. (2015). Ground source heat pumps and their interactions with underground railway tunnels in an urban environment – a review. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/227104882.pdf> (Last accessed: 23.04.2021).
26. Heinz Brandl. (2016). Geothermal Geotechnics for Urban Undergrounds. *Procedia Engineering*, 165, 747—764.
27. Otrabotannoye teplo ot londonskogo metro sogreyet sotni domov etoy zimoy. URL: <https://www.vzavtra.net/stroitelnye-tekhnologii/otrabotannoe-teplo-ot-londonskogo-metro-sogreet-sotni-domov-etoy-zimoy.html> (Last accessed: 23.04.2021) [in Russian].
28. Bunhill Heat and Power Islington. URL: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2019/07/bunhill-heat-and-power.pdf> (Last accessed: 13.04.2021).
29. Vasilyev, G.P., Gornov, V.F., Shapkin, P.V., Popov, M.I., & Burmistrov, A.A. (2018). Teplonasosnyye sistemy teplokhadosnabzheniya obyektov Moskovskogo metropolitena. *AVOK №2'2018*. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6859](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6859) (Last accessed: 07.05.2021) [in Russian].
30. Modernizatsiya sistemy teplosnabzheniya Minskogo metropolitena s vnedreniyem teplovykh nasosov. (2019). *Metro info*, 2, 16—18. URL: [http://www.asmetro.ru/upload/magazin/metro\\_0219.pdf](http://www.asmetro.ru/upload/magazin/metro_0219.pdf) (Last accessed: 06.05.2021) [in Russian].
31. Harlampidi, D.H., & Tarasova, V.A. (2012). K voprosu primeneniya vozdušnogo teplonasosnogo tsikla Braytona dlia sistem teplokhadosnabzheniya stantsiy metropolitenov. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 4(98), 40—48 [in Russian].
32. Teplovoy nasos CH-HP28CMFNM na st. metro Berestevskaya v Kiyeve. URL: <https://teplomir.com.ua/pf49387-teplovoy-nasos-hp28cmfnn.html> (Last accessed: 04.05.2021) [in Russian].
33. Teplovoy nasos Cooper&Hunter CH-HP28CMFNM 28 kVt. URL: <https://ek.ua/COOPER-HUNTER-CH-HP-28CMFNM.htm> (Last accessed: 29.04.2021) [in Russian].
34. Excess heat potentials of industrial sites in Europe. URL: <https://www.seenergies.eu/2020/06/03/excess-heat-potentials-of-industrial-sites-in-europe/> (Last accessed: 29.04.2021).
35. Bilodid, V.D. (2015). Assessing the possibilities for improving energy efficiency of TPPs based on flue gas heat exchangers and using heat pump installations. *The Problems of General Energy*, 2(41), 48—56 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.02.048>.
36. Kulyk, M.M., & Bilodid, V.D. (2014). Operational conditions of combined heat-and-power plants with heat pumps and the attainable utilization capacities of heat pumps at such plants in the Integrated Power System of Ukraine. *The Problems of General Energy*, 1(36), 39—45.
37. Large scale heat pumps in Europe. URL: <https://planenergi.eu/activities/district-heating/heat-pumps/>
38. Large scale heat pumps in Europe – 2nd edition. URL: <https://dryefficiency.eu/allgemein/large-scale-heat-pumps-in-europe-2nd-edition/> (Last accessed: 29.04.2021).

Надійшла до редколегії: 21.02.2022