

ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ СИСТЕМАМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ ЯК ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ТЕПЛИЙ ПЕРІОД РОКУ

Отримано 06 груд. 2024 р.; рекомендовано до публікації 14 бер. 2025 р.
Доступно онлайн 01 квіт. 2025 р.

Лисак О. В.

Автор для кореспонденції: Лисак Олег,
e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-4934-0685>

Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Анотація. У цій статті проаналізовано використання геотермальних систем холодопостачання системами кондиціювання повітря як засіб зниження навантаження на системи електропостачання в теплий період року. Знизити це навантаження можливо за рахунок використання більш енергоощадних технологій, таких як системи геотермального холодопостачання. Для цього було проаналізовано системи геотермального холодопостачання залежно від джерела холоду, схеми відбору холоду та схеми забезпечення температурного режиму холодоносія в системі холодопостачання будівлі. Аналіз показав, що витрати електроенергії будуть найменшими, якщо температура джерела холоду системи геотермального холодопостачання буде меншою за температуру холодоносія в системі холодопостачання будівлі. Це дозволить не використовувати холодильну машину та значно знизити витрати електроенергії в системі. Такий режим охолодження отримав назву «геоохолодження». Для порівняння енергоефективності різних схем застосовано коефіцієнт енергоефективності (EER), який показує співвідношення між обсягом холоду, виробленого системою холодопостачання, та електричною енергією, витраченою на роботу системи холодопостачання. Показано, що застосування технології «геоохолодження» дає змогу знизити витрати електроенергії у порівнянні з використанням повітряних холодильних машин на 90 %, а в разі використання холодильних машин з застосуванням геотермальних систем холодопостачання – на 77...80 %.

Ключові слова: електроенергія, геотермальне холодопостачання, холодопостачання, геоохолодження.

USE OF GEOTHERMAL COOLING BY AIR CONDITIONING SYSTEMS AS A MEANS OF REDUCING THE LOAD ON POWER SUPPLY SYSTEMS IN THE WARM SEASON

Received Dec. 06, 2024; accepted Mar. 14, 2025
Available online Apr. 01, 2025

Lysak O.

Author for correspondence: Lysak Oleh,
e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0002-4934-0685>

Institute of Renewable Energy of the NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. This article analyses the use of geothermal cooling systems by air conditioning systems as a means of reducing the load on the power supply systems during the warm season. This load can be reduced by using more energy efficient technologies such as geothermal cooling systems. For this purpose, geothermal cooling systems were analysed depending on the source of cold, the scheme of cold extraction and the scheme of ensuring the temperature mode of the cooling medium in the building's cooling system. The analysis showed that the lowest energy consumption occurs when the temperature of the cold source of the geothermal cooling system is lower than the temperature of the cooling medium in the building's cooling system. This would eliminate the need for a chiller and significantly reduce energy consumption in the system. This type of cooling is called 'geocooling'. To compare the energy efficiency of different systems, the energy efficiency ratio (EER) is used, which is the ratio between the amount of cooling produced by the cooling system and the electrical energy consumed by the cooling system. It shows that the use of geo-cooling technology can reduce electricity

consumption by 90% compared to the use of air-cooled chillers, and by 77-80% in the case of chillers with geothermal cooling systems.

Keywords: electricity, geothermal cooling, cooling supply, geocooling

Вступ

За останні два десятиліття істотно зросли енергетичні витрати на забезпечення холодопостачання будівель з метою охолодження приміщень [1]. Згідно з даними [2], у період з 1990 до 2016 року частка енергоспоживання житлових та комерційних будівель, спрямована на охолодження приміщень, від загального енергоспоживання зросла від 13 до 18,5 % – в абсолютних значеннях у той самий період кількість використаної для охолодження приміщень електроенергії потроїлась, досягнувши значення 2020 ТВт·год. Оскільки середньосвітовий рівень поширення систем кондиціонування повітря (СКП) для охолодження приміщень є досить низьким [1, 3], то існує значний потенціал для зростання їх використання й, відповідно, підвищення енергетичних витрат на забезпечення охолодження приміщень. І таке зростання рівня забезпечення охолодження приміщень пов'язане не лише зі створенням комфортних умов, але й з уникненням ризиків для здоров'я людини внаслідок спеки [4, 5].

Сьогодні для холодопостачання СКП з метою охолодження приміщень переважно застосовують холодильні машини (ХМ) – або теплові насоси (ТН) у режимі охолодження – з повітряним охолодженням [3], які, однак, не є найефективнішим варіантом. До того ж користувачі переважно вибирають такі моделі СКП, енергоефективність яких перебуває в нижньому діапазоні представлених на ринку СКП [2].

Тому особливої актуальності набуває розробка більш енергоефективних схем холодопостачання СКП у порівнянні з холодопостачанням від ХМ з повітряним охолодженням. Зокрема, більш енергоефективними системами холодопостачання вважаються системи геотермального холодопостачання [6].

Мета і задачі

Метою цієї роботи є оцінка рівня зниження навантаження на системи електропостачання в теплий період року за рахунок використання СКП геотермального холодопостачання замість холодопостачання з використанням ХМ з повітряним охолодженням. Для спрощення далі в роботі термін «геотермальне охолодження» використовується саме в контексті енергозабезпечення СКП в теплий період року.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- навести огляд основних типів систем геотермального холодопостачання;
- проаналізувати вибрані типи систем геотермального холодопостачання з огляду на витрати електроенергії для забезпечення їх роботи;
- оцінити зниження навантаження на системи електропостачання в теплий період року за рахунок вико-

ристання СКП геотермального холодопостачання різних типів замість холодопостачання з використанням ХМ з повітряним охолодженням.

Огляд основних типів систем геотермального холодопостачання

Для порівняння різних типів систем геотермального холодопостачання потрібно їх класифікувати за певними критеріями. В цьому аналізі розглянемо класифікації: за джерелом холоду, за схемою відбору холоду та за схемою забезпечення температурного режиму холодоносія в системі холодопостачання будівлі – з подальшим висновком по цих методах класифікації.

Класифікація за джерелом холоду необхідна для того, щоб відрізнити джерела холоду з одними характерними умовами від інших. Згідно з [7] термальна енергія Землі поділяється на три типи (рис. 1):

- *аеротермальна енергія*, де джерелом холоду є повітря;
- *гідротермальна енергія*, де джерелом холоду є поверхня водойми;
- *геотермальна енергія*, де джерелом холоду є ґрунт та підземні води.

Втім, такої класифікації дотримуються не завжди: наприклад, у [8] під терміном «геотермальні системи» разом розглядалися як геотермальні, так й гідротермальні системи попри те, що вони використовують різні джерела холоду. Тобто особливості роботи геотермальних та гідротермальних систем мають більше спільного, ніж аеротермальні системи, що спричиняє таке поєднання.



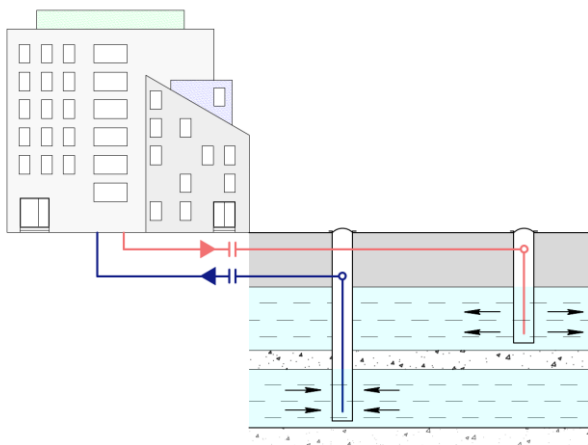
Рис. 1. Три типи термальної енергії Землі

Fig. 1. Three types of thermal energy of the Earth

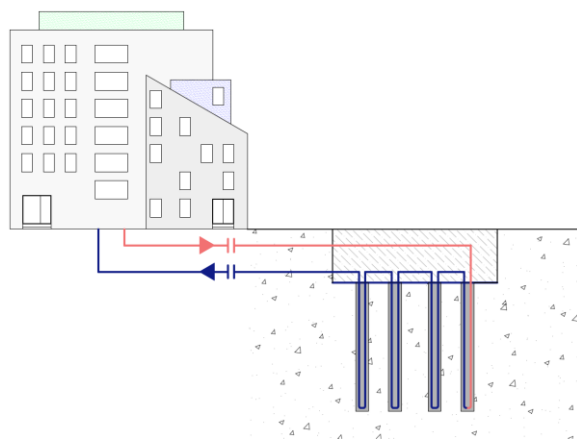
Класифікація за схемою відбору холоду необхідна для того, щоб розрізнити ці схеми залежно від способу забезпечення роботи системи холодопостачання та подальшим аналізом впливу схеми відбору холоду на показники енергоспоживання системи холодопостачання, зокрема з огляду на температуру джерела холоду. На основі аналізу робіт [7–9], що містили класифікації геотермальних систем холодопостачання, було виділено такі чотири основні схеми відбору холоду (рис. 2):

- схема з використанням водоносного горизонту (рис. 2, а);
- схема з використанням вертикальних свердловин (рис. 2, б);
- схема з використанням горизонтального теплообмінника (рис. 2, с);
- схема з використанням теплообмінника у відкритій водоймі (рис. 2, д).

а



б



с

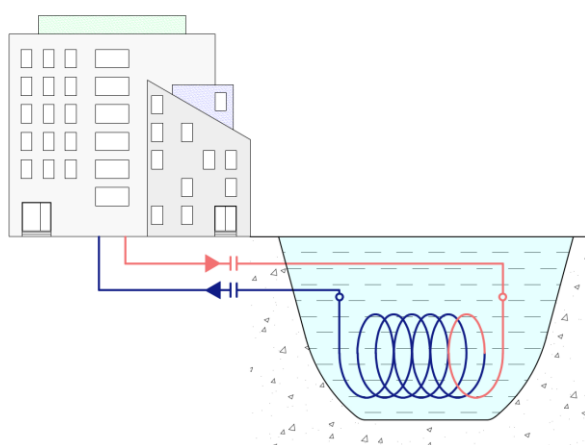
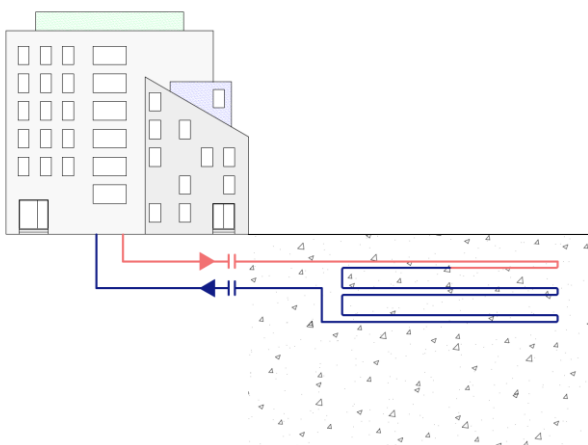


Рис. 2. Принципові схеми систем геотермального холодопостачання:

а – схема з використанням водоносного горизонту;

б – схема з використанням вертикальних свердловин;

с – схема з використанням горизонтального теплообмінника;

д – схема з використанням теплообмінника у відкритій водоймі

Fig. 2. Schematic diagrams of geothermal cooling systems:

a – scheme using an aquifer;

b – scheme using vertical boreholes;

c – scheme using a horizontal heat exchanger;

d – scheme with a heat exchanger in surface water

Варто відзначити, що четверта схема (рис. 2, д) є прикладом вищезгаданого випадку поєднання огляду геотермальних та гідротермальних джерел, бо хоч вона є гідротермальною, але в [8] внесена саме до переліку геотермальних систем (рис. 2, д).

Представлений список з чотирьох систем не є вичерпними, бо розглянуті системи мають різні варіанти виконання. Однак з огляду на те, що в літературі переважно використовуються узагальнені зображення систем геотермального холодопостачання, подальший аналіз буде обмежено узагальненими схемами.

Класифікація за схемою забезпечення температурного режиму холодоносія в системі холодопостачання будівлі необхідна для того, щоб визначити необхідний набір обладнання для забезпечення холодопостачання будівлі.

Вибір обладнання залежить від температури джерела холоду, від того, чи є температура джерела холоду $t_{дж}$, °C, вищою чи нижчою за температуру холодоносія в системі холодопостачання будівлі, який має охолотитись від початкової температури $t_{хл1}$, °C, до кінцевої температури $t_{хл2}$, °C (рис. 3):

1. якщо температура джерела холоду $t_{дж}$, °C, перевищує температуру холодоносія $t_{хл}$, °C, у системі

холодопостачання будівлі, то використовується ХМ (або ТН у режимі холодопостачання);

2. якщо температура джерела холоду $t_{дж}$, °C, є меншою за температуру холодоносія $t_{хл}$, °C, у системі холодопостачання будівлі, то достатньо використовувати теплообмінник.

З метою розрізнення на рис. 3 індекс температури джерела холоду $t_{дж}$, °C, показано залежно від того, більшою чи меншою за температуру холодоносія $t_{хл}$, °C, є ця температура у системі холодопостачання будівлі. Нижній індекс «дж» замінено для температури, вищої за температуру холодоносія, на «зовн», а для температури, нижчої за температуру холодоносія, – на «g».

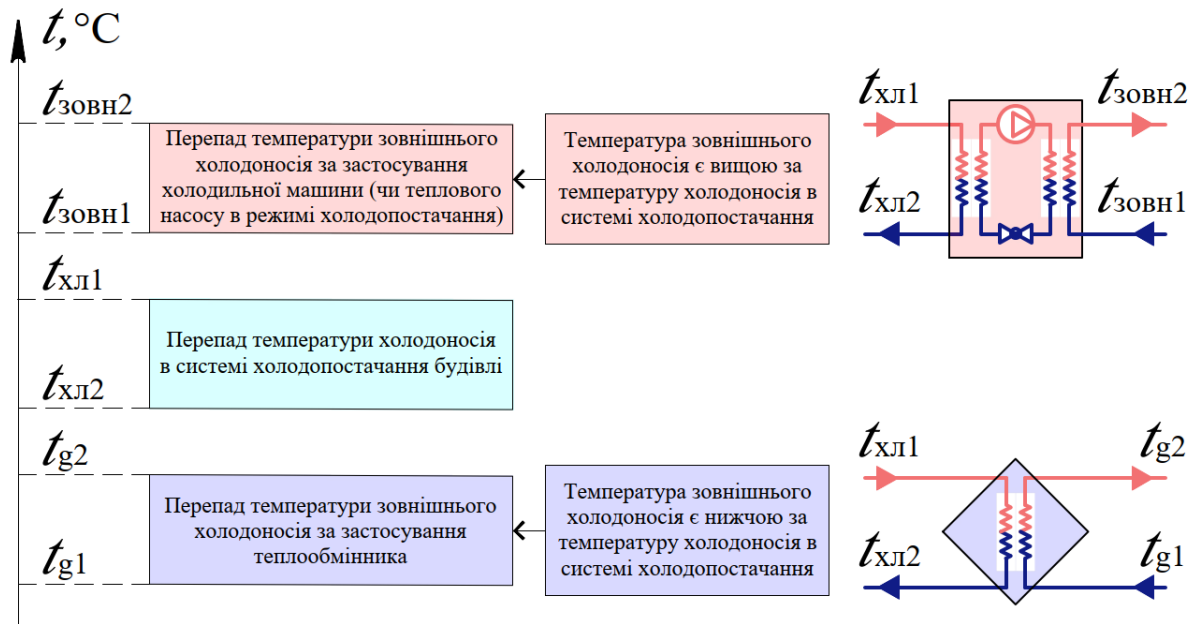


Рис. 3. Вибір схеми забезпечення температурного режиму холодоносія в системі холодопостачання будівлі

Fig. 3. Selection of the scheme for ensuring the temperature modes of the cooling medium in the building cooling system

Для позначення схеми з використанням теплообмінника та геотермального холодопостачання використовуються два терміни [10]: «геоохолодження» (англ. geocooling) та «вільне охолодження» (англ. free cooling). Оскільки термін «вільне охолодження» часто застосовується у контексті систем, що використовують як джерело холоду повітря (аеротермальне джерело холоду) [11], у цій роботі надається перевага терміну «геоохолодження» (geocooling), що підкреслює використання геотермального джерела холоду, а не аеротермального. При цьому потрібно відзначити, що хоча використання технології «геоохолодження» збільшилося за останнє десятиліття, зокрема через обмеження в певних країнах щодо застосування холодильних машин з повітряним охолодженням, у спеціалізованій літературі опис систем з використанням технології «геоохолодження» не є надто глибоким [12].

Як висновок щодо систем геотермального холодопостачання вкажемо, що найбільш ефективними вважаються такі системи, в яких температура зовнішнього холодоносія є нижчою за температуру холодоносія в системі холодопостачання [10–12]. Цим системам для генерації холоду достатньо забезпечити підведення

зовнішнього холодоносія до теплообмінника та відведення від нього, тобто електроенергія витратиться на забезпечення роботи насоса (для водяних систем) або вентилятора (для повітряних систем). У протилежному випадку, коли температура зовнішнього холодоносія є вищою за температуру холодоносія в системі холодопостачання, потрібно використовувати ХМ, що значно підвищує енергоспоживання через додаткові витрати електроенергії на забезпечення роботи компресора.

Саме тому для подальшого аналізу вибрано такі принципові схеми систем геотермального холодопостачання, температура яких як джерела холоду не залежить від температури зовнішнього повітря в теплий період року та є нижчою за температуру холодоносія [7–9]: систему з використанням водоносного горизонту й систему з використанням вертикальних свердловин.

Аналіз вибраних системи геотермального холодопостачання з огляду на витрати електроенергії для забезпечення їх роботи

Для оцінки енергоефективності систем холодопостачання використовують коефіцієнт, який характеризує співвідношення між згенерованою кількістю холоду та

кількістю електроенергії, спожитою системою генерації холоду. В літературі цей термін можуть позначати як коефіцієнт перетворення теплоти (*англ.* coefficient of performance, COP) [13], так і як коефіцієнт енергоефективності (*англ.* energy efficiency ratio, EER) [14]. Для подальшого аналізу використовуватиметься саме термін EER, для того, щоб уникнути плутанини з характеристикою COP для систем теплопостачання, як це було зроблено в [14]. Значення EER визначимо як:

$$EER = Q_b / W, \quad (1)$$

де Q_b – кількість холоду, спожитого будівлею, Вт (за умови, що відсутні втрати в системі – і тоді йдеться про обсяг холоду, вироблений системою холодопостачання); W – споживання електроенергії для забезпечення роботи системи холодопостачання, Вт:

$$W = W_{hp} + W_{cp}, \quad (2)$$

де W_{hp} – споживання електроенергії ХМ (або ТН у режимі холодопостачання), Вт; W_{cp} – споживання електроенергії насосами циркуляційної системи холодопостачання. В режимі «геоохолодження», коли $W_{hp} = 0$ Вт, рівняння (2) набуває такої форми:

$$W = W_{cp}. \quad (3)$$

Розглянута характеристика EER використовується для оцінки ефективності системи в конкретний момент часу. Для оцінки енергоефективності систем холодопостачання протягом усього теплого періоду року потрібно використовувати сезонний коефіцієнт енергоефективності (*англ.* seasonal energy efficiency ratio, SEER), який характеризує співвідношення не в конкретний момент часу, а протягом усього теплого періоду року [15]. Є й інші характеристики для оцінки сезонної ефективності систем холодопостачання: наприклад, сезонний коефіцієнт продуктивності (*англ.* seasonal performance factor, SPF), який дозволяє оцінити ефективність як окремої підсистеми, так і всієї системи загалом [15, 16].

При цьому потрібно враховувати, що здебільшого використовують комбіновані системи геотермального тепло- та холодопостачання, між якими є взаємний вплив через використання одного середовища як джерела теплоти й холоду. Оскільки тепло- та холодоспоживання систем не є однаковими, то в підсумку виникатиме дисбаланс. Наприклад, в [14] наводився приклад того, як в разі перевищення теплоспоживання над холодоспоживанням сезонний коефіцієнт енергоефективності SEER щорічно зростає на 8,7 % протягом чотирьох років, а аналогічний показник сезонного коефіцієнта перетворення теплоти (*англ.* seasonal coefficient of performance, SCOP) для системи теплопостачання знижувався щорічно на 4 % за аналогічний період в чотири роки. Зміна клімату, пов'язана з глобальним потеплінням, коли теплоспоживання зменшуватиметься, а холодоспоживання зростатиме [17], приведе до зменшення цього дисбалансу [18].

З метою спрощення подальшого аналізу використаємо саме характеристику EER (табл. 1) залежно від типу використовуваної системи.

Таблиця 1. Значення EER для систем геотермального холодопостачання

Table 1. EER values for geothermal cooling systems

Тип охолодження	Джерело	Рік праці	EER
З використанням вертикальних свердловин			
Холодильна машина	[19]	2024	6
	[20] ⁽¹⁾	2020	3,2...4,4
	[14]	2015	8
Geocooling	[19]	2024	30
З використанням водоносного горизонту			
Холодильна машина	[19]	2024	7
	[21] ⁽²⁾	2024	10 (5...73)
Geocooling	[19]	2024	30
	[21] ⁽²⁾	2024	40 (12...165)
З використанням повітряного охолодження			
Холодильна машина	[19]	2024	2,75...3
	[20] ⁽³⁾	2020	2,20...3,4
	[22]	2023	2,5

Примітка: ⁽¹⁾ значення наведено для перепаду температури зовнішнього холодоносія у випарнику 30/7 °C та діапазону потужності 0...20 кВт; ⁽²⁾ мода з розподілу та розподіл (наведений в дужках діапазон), отримані методом Монте-Карло; ⁽³⁾ значення наведено за температурою холодоносія 7 °C та використанням холодильної машини (з інвертором) з діапазоном потужності 0...30 кВт.

Оцінка зниження навантаження на системи електропостачання внаслідок переходу від повітряних до геотермальних систем холодопостачання

Для оцінки зниження навантаження на системи електропостачання внаслідок переходу від повітряних систем до геотермальних систем холодопостачання використовуємо співвідношення E_i , %, що характеризує відсоток зниження навантаження на систему електропостачання у порівнянні з системою використанням ХМ з повітряним охолодженням:

$$E_i = \left(1 - \left(EER_{air} / EER_i\right)\right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

де EER_i – коефіцієнт енергоефективності i -ї системи; EER_{air} – коефіцієнт енергоефективності системи, що використовує повітря як джерело холодопостачання. Для розрахунків EER_i були вибрані такі значення з табл. 1: для ХМ з повітряним охолодженням $EER_{air} = 3$; для ХМ з використанням вертикальних свердловин $EER_{bh} = 6$; для ХМ з використанням водоносного горизонту $EER_{aq} = 7$; для систем, що працюють у режимі «геоохолодження» (незалежно від джерела), $EER_{geo} = 30$.



Рис. 4. Економія електроенергії в порівнянні з холодильними машинами з повітряним охолодженням, %

Fig. 4. Energy savings compared to air-cooled chillers, %

Результати розрахунків, представлені на рис. 4, свідчать про значне зниження витрат електроенергії під час переходу від ХМ з повітряним охолодженням до геотермальних систем холодопостачання. Використання ХМ, що застосовують вертикальні свердловини або водоносний горизонт, дозволяє зменшити витрати електроенергії вдвічі, тоді як перехід на систему «геоохолодження» забезпечує зменшення енергоспоживання до 90 %.

Зниження споживання електроенергії в разі переходу на використання «геоохолодження» замість використання систем геотермального холодопостачання з використанням ХМ визначатиметься як:

$$E_j = \left(1 - \left(EER_j / EER_{geo}\right)\right) \cdot 100\%, \quad (5)$$

де EER_j – коефіцієнт енергоефективності j -ї системи геотермального холодопостачання з використанням ХМ.

При аналогічних показниках, що застосовувались для рівняння (4), зниження споживання електроенергії становитиме 77...80 %. Це значення дещо перевищує дані з аналізу, наведеного в [21], щодо зниження навантаження на енергомережу в разі використання «геоохолодження» замість системи з ХМ, де значення зниження навантаження на енергетичну мережу становило 70 %. При цьому обчислене методом Монте-Карло значення моди зниження споживання електроенергії [21], отримане в разі переходу від використання холодильної машини до «геоохолодження» (на прикладі застосування водоносного горизонту), становить 40 % (при діапазоні розбіжності даних 19...93 %).

Висновки:

Проведений аналіз показав, що наявний опис систем геотермального холодопостачання СКП є достатньо узагальненим, без вказівок на конкретні характеристики систем. Саме тому необхідні подальші дослідження з метою уточнення характеристик цих систем для підвищення точності попередньої оцінки їх коефіцієнта енергоефективності EER та сезонних значень такого коефіцієнта для теплого періоду року.

Проведений аналіз показав істотну економію електроенергії при холодопостачанні СКП в разі переходу на технологію «геоохолодження». Застосування цієї технології дозволяє знизити витрати електроенергії у порівнянні з випадком використання ХМ з повітряним охолодженням на 90 %, а в разі використання ХМ з застосуванням геотермальних систем холодопостачання – на 77...80 %.

ПОСИЛАННЯ

1. Scoccimarro E. et al. Country-level energy demand for cooling has increased over the past two decades. *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol. 4, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00878-3>
2. The Future of Cooling – Analysis – IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> (дата звернення: 05.11.2024).
3. Santamouris M. Cooling the buildings – past, present and future. *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 128. P. 617–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
4. Laine H. S. et al. Meeting global cooling demand with photovoltaics during the 21st century. *Energy & Environmental Science*. 2019. Vol. 12, no. 9. P. 2706–2716. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ee00002j>
5. Romanello M. et al. The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. *The Lancet*. 2021. Vol. 398, no. 10311. P. 1619–1662. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)01787-6)
6. Duarte W. M. et al. Comparative study of geothermal and conventional air conditioner: A case of study for office applications. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 65. P. 105786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105786>
7. Figueira J. S. et al. Shallow geothermal energy systems for district heating and cooling networks: review and technological progression through case studies. *Renewable Energy*. 2024. Vol. 236. P. 121436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121436>
8. Soltani M. et al. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 44. P. 793–818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.036>

9. García Gil et al. Shallow geothermal energy. Cham: Springer International Publishing, 2022. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92258-0>
10. Pahud D., Belliardi M., Caputo P. Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings. Renewable Energy. 2012. Vol. 45. P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.008>
11. Перепелиця І. В., Зур'ян О. В. Прикладна методологія комплексного застосування технологій free cooling і тепловий насос. Відновлювана енергетика. 2024. № 1(76). С. 109–117. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).109-117](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).109-117)
12. Belliardi M. et al. A method to analyze the performance of geocooling systems with borehole heat exchangers. Results in a monitored residential building in Southern Alps. Energies. 2021. Vol. 14, no. 21. P. 7407. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217407>
13. Carroll P., Chesser M., Lyons P. Air Source Heat Pumps field studies: a systematic literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 134. P. 110275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>
14. Luo J. et al. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. Geothermics. 2015. Vol. 53. P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>
15. Kirschstein X. et al. Regeneration of shallow borehole heat exchanger fields: a literature review. Energy and Buildings. 2024. Vol. 317. P. 114381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114381>
16. McKenna P., Turner W. J. N., Finn D. P. Geocooling with integrated PCM thermal energy storage in a commercial building. Energy. 2018. Vol. 144. P. 865–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.029>
17. Bell N. O. et al. Future climate scenarios and their impact on heating, ventilation and air-conditioning system design and performance for commercial buildings for 2050. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 162. P. 112363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112363>
18. Stemmler R. et al. Potential of low-temperature aquifer thermal energy storage (LT-ATES) in Germany. Geothermal Energy. 2022. Vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00234-2>
19. Cazal J. L'AFPG publie une étude sur le rôle de la géothermie dans la climatisation et le rafraîchissement - AFPG. AFPG. URL: <https://www.afpg.asso.fr/lafpg-publie-une-etude-sur-le-role-de-la-geothermie-dans-la-climatisation-et-le-rafraichissement/> (date of access: 04.11.2024).
20. Mouzeviris G. A., Papakostas K. T. Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. International Journal of Sustainable Energy. 2020. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1794864>
21. Jackson M. D., Regnier G., Staffell I. Aquifer Thermal Energy Storage for low carbon heating and cooling in the United Kingdom: Current status and future prospects. Applied Energy. 2024. Vol. 376. P. 124096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124096>
22. Elnagar E. et al. A qualitative assessment of integrated active cooling systems: A review with a focus on system flexibility and climate resilience. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 175. P. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113179>

REFERENCES

1. Scoccimarro E. et al. Country-level energy demand for cooling has increased over the past two decades. Communications Earth & Environment. 2023. Vol. 4, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00878-3>
2. The Future of Cooling – Analysis - IEA. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling> (date of access: 05.11.2024).
3. Santamouris M. Cooling the buildings – past, present and future. Energy and Buildings. 2016. Vol. 128. P. 617–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
4. Laine H. S. et al. Meeting global cooling demand with photovoltaics during the 21st century. Energy & Environmental Science. 2019. Vol. 12, no. 9. P. 2706–2716. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ee00002j>
5. Romanello M. et al. The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: code red for a healthy future. The Lancet. 2021. Vol. 398, no. 10311. P. 1619–1662. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)01787-6)
6. Duarte W. M. et al. Comparative study of geothermal and conventional air conditioner: A case of study for office applications. Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. P. 105786. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105786>
7. Figueira J. S. et al. Shallow geothermal energy systems for district heating and cooling networks: review and technological progression through case studies. Renewable Energy. 2024. Vol. 236. P. 121436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121436>
8. Soltani M. et al. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 44. P. 793–818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.036>
9. García Gil et al. Shallow geothermal energy. Cham: Springer International Publishing, 2022. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92258-0>

-
10. Pahud D., Belliardi M., Caputo P. Geocooling potential of borehole heat exchangers' systems applied to low energy office buildings. *Renewable Energy*. 2012. Vol. 45. P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.008>
 11. Perepelytsia I., Zurian O. Applied methodology of complex application of free cooling and heat pump technologies. *Vidnovluvana energetika*. 2024. No. 1(76). P. 109–117. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).109-117](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).109-117) [in Ukrainian]
 12. Belliardi M. et al. A method to analyze the performance of geocooling systems with borehole heat exchangers. Results in a monitored residential building in Southern Alps. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 21. P. 7407. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217407>
 13. Carroll P., Chesser M., Lyons P. Air Source Heat Pumps field studies: a systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. P. 110275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110275>
 14. Luo J. et al. Heating and cooling performance analysis of a ground source heat pump system in Southern Germany. *Geothermics*. 2015. Vol. 53. P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.004>
 15. Kirschstein X. et al. Regeneration of shallow borehole heat exchanger fields: a literature review. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 317. P. 114381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114381>
 16. McKenna P., Turner W. J. N., Finn D. P. Geocooling with integrated PCM thermal energy storage in a commercial building. *Energy*. 2018. Vol. 144. P. 865–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.029>
 17. Bell N. O. et al. Future climate scenarios and their impact on heating, ventilation and air-conditioning system design and performance for commercial buildings for 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 162. P. 112363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112363>
 18. Stemmler R. et al. Potential of low-temperature aquifer thermal energy storage (LT-ATES) in Germany. *Geothermal Energy*. 2022. Vol. 10, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40517-022-00234-2>
 19. Cazal J. L'AFPG publie une étude sur le rôle de la géothermie dans la climatisation et le rafraîchissement – AFPG. AFPG. URL: <https://www.afpg.asso.fr/lafpg-publie-une-etude-sur-le-role-de-la-geothermie-dans-la-climatisation-et-le-rafraichissement/> (date of access: 04.11.2024). [in French]
 20. Mouzeviris G. A., Papakostas K. T. Comparative analysis of air-to-water and ground source heat pumps performances. *International Journal of Sustainable Energy*. 2020. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2020.1794864>
 21. Jackson M. D., Regnier G., Staffell I. Aquifer Thermal Energy Storage for low carbon heating and cooling in the United Kingdom: Current status and future prospects. *Applied Energy*. 2024. Vol. 376. P. 124096. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124096>
 22. Elnagar E. et al. A qualitative assessment of integrated active cooling systems: A review with a focus on system flexibility and climate resilience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 175. P. 113179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113179>
-