

Сергій Петрович Данилів<sup>1</sup>, Павло Сергійович Гусєв<sup>2</sup>

<sup>1</sup>аспірант

Інститут загальної енергетики НАН України, (Київ, Україна)

E-mail: [sergiy@hajster.com](mailto:sergiy@hajster.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9842-5501>

<sup>2</sup>аспірант

Інститут загальної енергетики НАН України, (Київ, Україна)

E-mail: [gusiev@hajster.com](mailto:gusiev@hajster.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1354-5181>

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ТА ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ В УКРАЇНІ

У статті представлено порівняльний аналіз двох основних типів теплових насосів: повітря/вода (ASHP) та геотермальних (GSHP) на основі даних систем, встановлених в Україні. В рамках дослідження отримано дані продуктивності та ефективності теплових насосів. Окремо проаналізовано вплив типу системи опалення/охолодження на параметри продуктивності теплонасосного обладнання. Також, розглянуто вплив змін клімату на ефективність роботи обох типів теплових насосів. Як результат дослідження, виділено ключові фактори, які слід враховувати в майбутньому під час планування систем з тепловими насосами. Крім цього, надано рекомендації щодо вибору типу теплових насосів, враховуючи прогнозовані кліматичні зміни та умови експлуатації.

Дослідження показало, що середній SCOP геотермальних ТН становив 4.8, а повітряних - 3.8. Ключовим чинником ефективності виявилася температура теплоносія: низькотемпературні системи підвищують SCOP на 20-30 %. Кліматичні зміни, що призводять до зростання середньої температури опалювального сезону, сприяють ширшому впровадженню повітряних теплових насосів. Внаслідок збільшення тривалості жарких періодів, зростає навантаження на системи охолодження, що додає переваги геотермальним тепловим насосам, завдяки можливості облаштування системи природного охолодження будівель (NC - natural cooling).

**Ключові слова:** геотермальні теплові насоси; повітряні теплові насоси; COP; SCOP; низькотемпературні системи опалення.

Рис.: 6. Табл.: 3. Бібл.: 24.

**Актуальність теми дослідження.** У загальному розподілі споживання енергії в Україні, витрати на теплопостачання будівель складають значну частину. Через військову агресію росії були втрачені значні промислові потужності, що призвело до зміни енергетичного балансу України, в якому основними споживачами стали житловий та комунальний сектори [1]. Зношена та моральна застаріла інфраструктура існуючих систем теплопостачання, їхня залежність від викопного палива потребують впровадження нових високоефективних та екологічних рішень, серед яких застосування технології теплових насосів відіграє ключову роль [2]. Подальша електрифікація всіх сфер економіки та можливість створювати децентралізовані системи теплопостачання ще більше підсилюють позиції теплонасосного обладнання.

**Постановка проблеми.** Суттєвою перевагою теплових насосів є те, що вони можуть бути використані не тільки в новому будівництві, але і під час реконструкції об'єктів різного призначення та розмірів [3; 4]. Тепловий насос може бути ефективно застосований як в житловому, так і промисловому секторах, задовольняючи потреби в опаленні, охолодженні та гарячому водопостачанні об'єктів будь-якої складності [5]. Також технологія теплових насосів успішно застосовується в промислових процесах, що потребують гарячої води чи пари [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Європейський ринок теплових насосів демонструє постійне зростання. Хоча після стрімкого зростання у 2022 та 2023 рр. відбувся деякий спад продажів. Так, за даними звіту EurObserv'ER [7], що створюється на замовлення Європейської Комісії, у 2022 році в країнах ЄС було встановлено 1 573 232 одиниць обладнання, а у 2023 році – 1 448 943 штук. Повітряні теплові насоси займають домінуючу позицію, з часткою більш ніж 90 % від загальної кількості встановлених при-

строїв. Водночас на фоні загального спаду ринку продажі геотермальних теплових насосів показали у 2023 році зростання – було встановлено 136 914 пристроїв проти 123 485 одиниць у 2022 році.

Лідерами європейського ринку є Франція, Німеччина, Нідерланди, Італія та Швеція. У цих країнах активно розвивається ринок як повітряних, так і геотермальних теплових насосів. У країнах півдня Європи, з більш м'яким кліматом, переважають повітряні теплові насоси. Водночас у Північній Європі та Альпійському регіоні встановлюється більша кількість геотермальних теплових насосів, що зумовлено сталою роботою таких пристроїв в умовах холодного клімату.

Український ринок теплових насосів останні роки активно розвивається, але поки що залишається дуже далеким від європейських обсягів. І без масштабних програм державної підтримки впровадження теплових насосів та ринкових цін на викопне паливо (зокрема, природний газ) не слід очікувати суттєвого збільшення кількості теплонасосних установок [8]. Офіційної статистики щодо обсягів продаж та виробництва теплової енергії тепловими насосами в Україні немає. Ринок характеризується практично повною залежністю від імпорту обладнання. Згідно з митними даними, у 2020 році було імпортовано 1433 теплові насоси, а у 2021 році – 3019 одиниць. У 2023–2024 рр. оціночний щорічний обсяг встановлення теплових насосів усіх типів та потужностей в Україні коливався від 1300 до 1500 одиниць. Більшість продажів припадає на теплові насоси «повітря-вода» потужністю 10...15 кВт [9].

Як і в країнах ЄС, в Україні частка повітряних теплових насосів становить близько 80 % [10]. Геотермальні теплові насоси використовуються переважно в комерційних проєктах або приватному житловому будівництві преміумсегмента, що зумовлено високою початковою вартістю бурових робіт та обладнання для геотермального поля. Водночас геотермальні системи забезпечують більш сталу ефективність під час зміни погодних умов та надають можливість пасивного охолодження будівель, що є дуже актуальним, враховуючи збільшення спекотних періодів, внаслідок кліматичних змін [11].

Впродовж останнього десятиріччя кліматичні умови в Україні зазнають суттєвих змін. За даними Українського Гідрометцентру та міжнародних дослідницьких інституцій спостерігається стійка тенденція до зростання середньорічної температури, яка в середньому становить +0,7...+1,1 °C за останні 15 років [12]. Уже зараз спостерігається скорочення тривалості опалювального періоду, пом'якшення зим та збільшення періодів літньої спеки [13].

Вибірка температурних даних аеропорту Жуляни (Київ, Україна) з 2014 по 2019 рік (рис. 1) підтверджує тенденцію підвищення середньої температури та відсутність екстремально низьких значень в зимовий період [14]. Найнижча температура, яка була зафіксована в межах цієї вибірки, припала на опалювальний сезон 2015/2016 та становила - 18,8 °C і при цьому, тривала лише протягом декількох годин. Водночас 67 % цього опалювального періоду (113 днів) зовнішня температура не опускалась нижче 0 °C і лише 30 днів мали температуру нижче за -2,5 °C, з яких тільки 3 дні були з температурою нижче ніж -15 °C.

Такі кліматичні зміни впливають на структуру ринку теплових насосів:

- повітряні теплові насоси (ASHP), внаслідок підвищення зимових температур та скорочення опалювального сезону, демонструють вищу продуктивність та зростання сезонного коефіцієнта продуктивності (SCOP). У поєднанні з нижчою вартістю встановлення ніж геотермальні установки, повітряні теплові насоси стають дедалі привабливішими для кінцевого споживача [15].

- зміна зовнішніх умов практично не впливає на роботу геотермальних теплових насосів (GSHP), їхню ефективність залишається майже сталою протягом всього опалювального сезону. Однак висока вартість є перешкодою для широкого впровадження геотермальних установок [16]. З іншого боку, можливість використання пасивного охолодження за рахунок низької температури геотермального поля, дає суттєву перевагу таким рішенням в умовах збільшення періодів спеки та зростання попиту на охолодження [17].

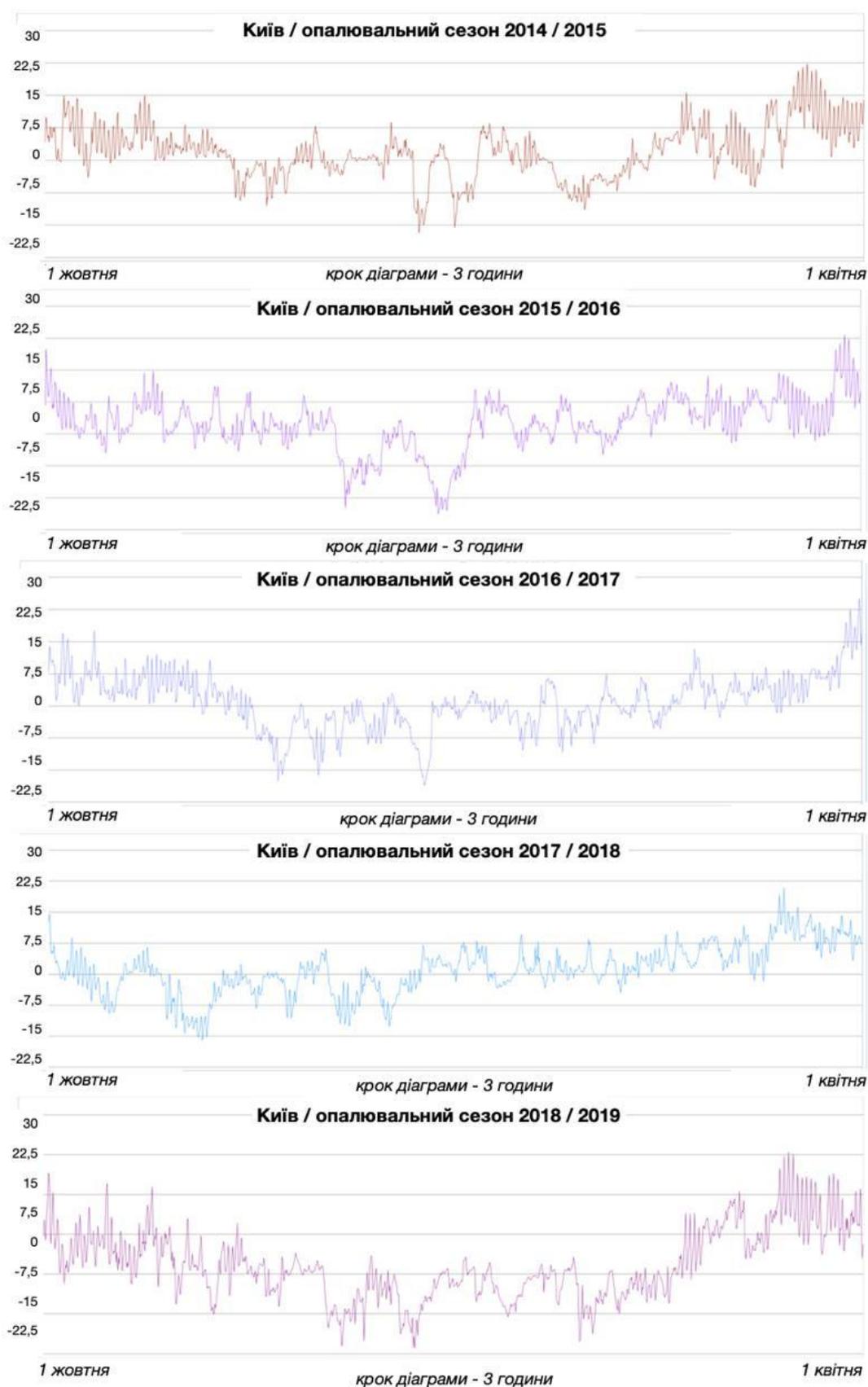


Рис. 1. Вибірка даних температур (опалювальний сезон) у м. Києві, аеропорт Жуляни в період з 2014 по 2019 роки

Важливо зазначити, що подальше підвищення температури веде до різкого зростання потреби в охолодженні. Згідно зі статистичними даними, кількість днів із температурою вище 30 °С в період з 2010 до 2023 року в Україні зросла на 20...40 %, залежно від регіону [18]. За таких умов, навантаження на охолодження в Україні наблизатиметься до потреб теплопостачання і в майбутньому може потребувати більше енергії ніж опалення. Такі зміни та тенденції повинні враховуватись при розрахунках потужності, виборі типу теплового насоса, конфігурації системи та економічному обґрунтуванні.

Умови експлуатації в Україні дозволяють ефективно використовувати як повітряні, так і геотермальні теплові насоси. Враховуючи актуальні температурні показники та прогнозовані кліматичні зміни, використання повітряних теплових насосів доцільне не лише у південних та західних регіонах з м'якшими зимами, але також стає більш обґрунтованим у центральних та північних областях України.

Вибір типу теплового насоса залежить від низки технічних, експлуатаційних та економічних параметрів. Основними показниками ефективності є COP (coefficient of performance / коефіцієнт перетворення), SCOP (Seasonal COP / сезонний COP), а також стабільність продуктивності в умовах низьких температур. Окрім цього, важливо враховувати навантаження системи охолодження та прогнозовані витрати на її функціонування [19; 20].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Одним з важливих факторів, що впливає на ефективність застосування теплових насосів є конфігурація системи опалення/охолодження. Попри те, що сьогодні як холодоагент дедалі частіше використовується R290 (пропан), що здатен забезпечити вищу температуру подачі теплоносія, низькотемпературні системи опалення залишаються важливим фактором загальної ефективності теплових насосів. Адже, зниження температури подачі в режимі нагріву на 1 °С збільшує COP системи орієнтовно на 2...4 % (залежить від типу теплового насоса, холодоагенту та температурного режиму) [21]. З іншого боку, використання води з вищою температурою в поверхневих системах охолодження збільшує ефективність установки в літній період. Тому оптимальним рішенням є поєднання теплових насосів з поверхневими системами: теплою підлогою, стіновими та стельовими панелями, особливо, якщо використовується пасивне охолодження (NC). Важливою перевагою такої комбінації є здатність поверхневих систем працювати як в режимі опалення, так і охолодження [22].

**Метою статті** є питання ефективності теплових насосів в кліматичних умовах України, яке порушувалося в декількох дослідженнях [23]. Проте оскільки кількість встановлених в Україні теплових насосів є відносно невеликою і переважна більшість пристроїв встановлено в приватному секторі, досліджень енергетичної ефективності діючих теплових насосів в Україні проводилось недостатньо.

У контексті вищезазначеного виникає потреба у глибшому аналізі ефективності діючих в Україні теплових насосів обох типів: повітряних і геотермальних, що і становить предмет дослідження цієї статті.

Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу COP (коефіцієнт перетворення) та SCOP (сезонний COP) теплових насосів типу повітря-вода (ASHP) та геотермальних (GSHP) у реальних умовах експлуатації в Україні. Особливу увагу в дослідженні приділено:

- впливу кліматичних умов на ефективність теплових насосів;
- впливу типу джерела тепла на ефективність системи (повітря/грунт);
- ролі конфігурації систем опалення та охолодження

**Виклад основного матеріалу.**

**Методи й матеріали.**

*Об'єкти дослідження.* Для аналізу вибрано 11 об'єктів з тепловими насосами, потужністю від 13 до 84 кВт, які розташовані в містах Київ та Львів, їх основні характеристики наведено в Таблиці 1.

Всі об'єкти вибірки мають встановлені теплові насоси однієї торгової марки - Ватеркотте, що використовують той же самий фреон - R410. Також ці теплові насоси оснащені однаковим програмним забезпеченням. Усі досліджувані геотермальні теплові насоси використовують як джерело тепла вертикальні ґрунтові зонди.

Однакові конструктивні особливості теплових насосів та аналогічний холодоагент, дозволяють провести більше коректне порівняння параметрів ефективності. Усі теплові насоси, робота яких аналізується, обладнані системою енергетичного менеджменту, яка дозволяє фіксувати такі дані:

- кількість спожитої електроенергії;
- кількість виробленої теплової енергії;
- COP / SCOP (миттєвий / сезонний);
- аналіз даних в розрізі різних режимів роботи: опалення / ГВП;
- аналіз даних в розрізі різних часових проміжків: місяць/рік;
- частку роботи додаткового нагрівача.

Об'єкти дослідження розташовані у двох областях України, що мають деякі кліматичні відмінності. Розподіл об'єктів за регіонами дозволяє проаналізувати вплив різних кліматичних зон на продуктивність теплових насосів. Усі проекти, які досліджуються, є новими будівлями, що мають якісну теплоізоляцію та енергоефективні вікна. Обрані теплові насоси експлуатуються не менше 3-х років.

*Таблиця 1. Основні характеристики об'єктів, що досліджуються*

№	Регіон	Тип ТН	Модель та виробник ТН	Теплова потужність	Фреон	Джерело тепла	Тип системи опалення	Тип системи охолодження
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410a	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі
2	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5112.5DT	84,8 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори + конвектори	Фанкойли
3	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5018	13,1 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни	Тепла підлога + стіни
4	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5023	17,3 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + стіни	Тепла підлога + фанкойли
5	Київ	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори + конвектори	Фанкойли
6	Київ	ASHP	Waterkotte EcoTouch Air Kaskade 5030.5	26,8 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі
7	Київ	ASHP	Waterkotte Eco Touch DA 5018.Ai	16 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + радіатори	Фанкойли
8	Львів	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5056T	42,4 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зонди	Тепла підлога + радіатори	Стельові панелі + стіни

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	Львів	GSHP	Waterkotte Eco Touch 5018	13,1 кВт (при B0/W35)	R410	Вертикальні ґрунтові зони	Тепла підлога + конвектори	Фанкойли
10	Львів	ASHP	Waterkotte Eco Touch Split 5015.5	13,4 кВт (при A2/W35)	R410a	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + радіатори	Фанкойли
11	Львів	ASHP	Waterkotte EcoTouch Air Kaskade 5030.5	26,8 кВт (при A2/W35)	R410	Зовнішнє повітря	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	Тепла підлога + стіни + стельові панелі

*Параметри аналізу.* Усі показники беруться з вбудованих датчиків та приладів обліку енергії теплових насосів Waterkotte. Для кожного об'єкта проаналізовано такі показники: сезонний COP (SCOP) для режимів опалення, ГВП; питомі витрати електроенергії (кВт·год/м<sup>2</sup>/рік); вироблена теплова енергія в режимах опалення та ГВП; річна динаміка продуктивності в залежності від температури зовнішнього середовища; вплив типу розподільчої системи тепла/холоду (поверхневе / конвекційне / змішане) на SCOP.

### Результати аналізу.

Для аналізу роботи теплових насосів використано опалювальний сезон 2023/2024 років. Період вибірки: 15.10.2024 - 31.03.2025. Отримані дані ефективності теплових насосів та температурні показники роботи установок приведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані аналізу продуктивності та ефективності теплових насосів (період вибірки: 15.10.2024 - 31.03.2025)

№	Регіон	Тип ТН	Теплова потужність	Тип системи опалення	COP, згідно з даними виробника	SCOP опалення	SCOP ГВП	Т.сер. опалення, °C	Т.макс. опалення, °C	Т. гаряча вода, °C
1	Київ	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога стельові панелі	4,5 (при B0/W35)	5,17	3,2	31,5	35,6	50
2	Київ	GSHP	84,8 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	4,5 (при B0/W35)	4,0	2,92	45,3	52	55
3	Київ	GSHP	13,1 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стіни	5 (при B0/W35)	5,03	3,2	35,1	38,3	50
4	Київ	GSHP	17,3 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стіни	4,7 (при B0/W35)	4,52	3,15	40,2	49	50
5	Київ	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	4,5 (при B0/W35)	3,85	2,82	43,6	54	55
6	Київ	ASHP	26,8 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при A2/W35)	4,02	2,58	33,6	35,2	55
7	Київ	ASHP	16 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + радіатори	4,6 (при A2/W35)	3,53	2,53	43,8	53	55
8	Львів	GSHP	42,4 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при B0/W35)	5,0	3,17	33,4	38,7	52
9	Львів	GSHP	13,1 кВт (при B0/W35)	Тепла підлога + конвектори	5 (при B0/W35)	4,83	3,1	34,8	40,0	50
10	Львів	ASHP	13,4 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + радіатори	4,5 (при A2/W35)	3,63	3	41,4	52,7	50
11	Львів	ASHP	26,8 кВт (при A2/W35)	Тепла підлога + стельові панелі	4,5 (при A2/W35)	4,08	2,9	32,1	36,8	55

Аналіз даних ефективності теплових насосів (рис. 2 і 3) показує вплив зовнішньої температури на значення SCOP. Зменшення COP внаслідок зниження зовнішньої температури чітко простежується для повітряних теплових насосів. Значення COP повітряних ТН коливаються від 2,7 до 5.

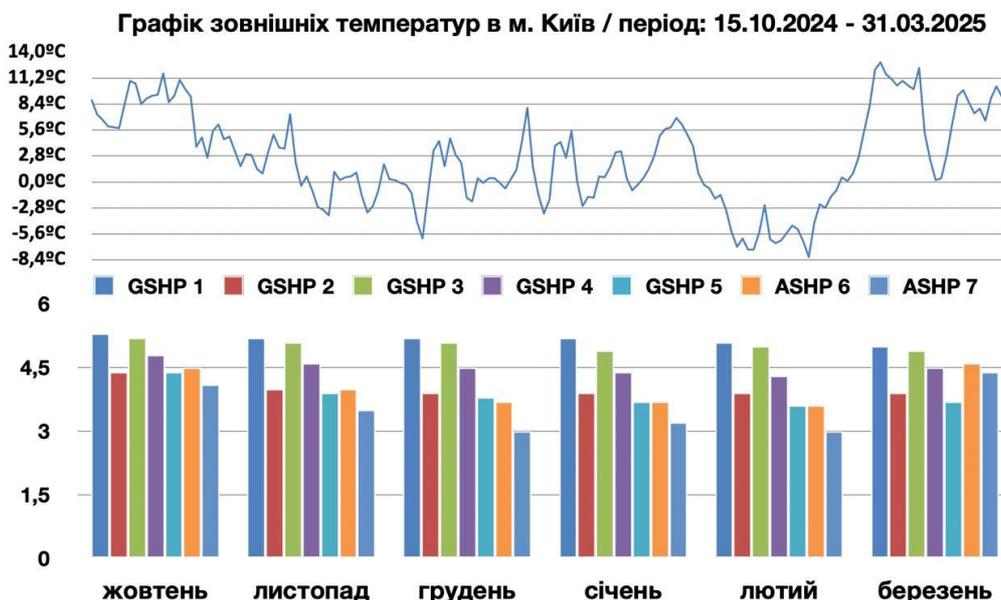


Рис. 2. Вплив зовнішньої температури на SCOP (опалення) геотермальних і повітряних теплових насосів (локація: Київ)

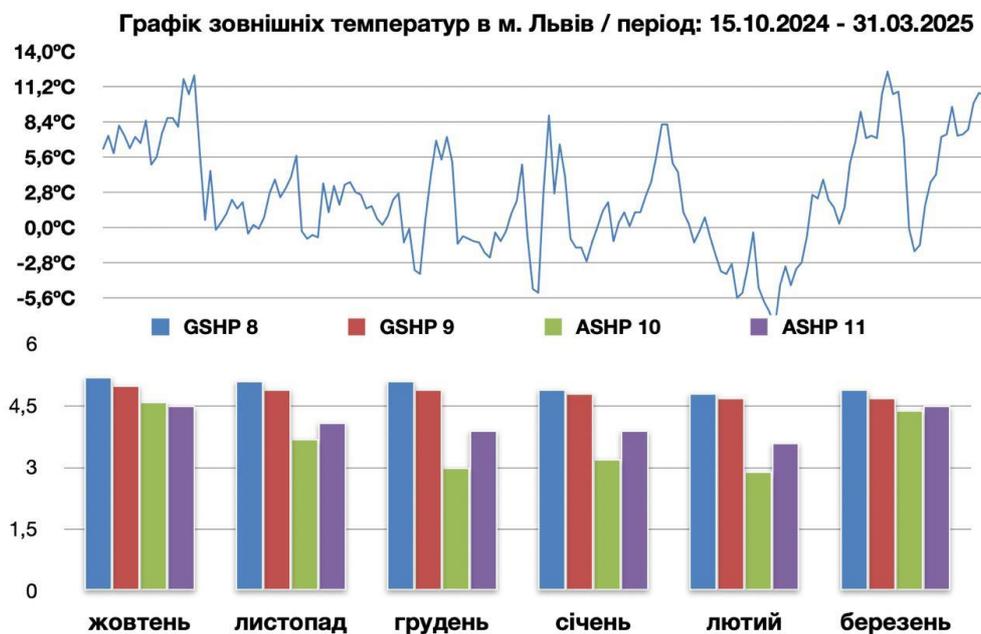


Рис. 3. Вплив зовнішньої температури на SCOP (опалення) геотермальних і повітряних теплових насосів (локація: Львів)

Повітряні теплові насоси на початку та в кінці опалювального сезону, коли температура зовнішнього повітря підвищується, мають схожі до геотермальних теплових насосів значення ефективності.

Для геотермальних теплових насосів характерні незначні коливання ефективності, які виникають внаслідок зростання тепловтрат будівлі, і як наслідок – необхідності підвищення температури подачі теплоносія. Також, на зменшення COP геотермальних насосів впливає зниження температури геотермального поля в другій половині опалювального сезону.

Слід зазначити, що в жовтні та березні повітряні теплові насоси мають вищу ефективність ніж окремі геотермальні теплові насоси. Загалом спостерігається більш стабільна робота геотермальних теплових насосів протягом усього опалювального сезону. А на зменшення ефективності GSHP більший вплив має зниження температури геотермального поля, а не зовнішня температура.

Графіки зовнішньої температури для Києва та Львова (рис. 2 і 3) мають схожі середні показники, що призводить до практично однакових параметрів ефективності для теплових насосів, що встановлені в цих двох регіонах.

Порівняння значень енергоефективності теплових насосів у режимі гарячого водопостачання (ГВП) вказує на ті ж самі тенденції, що і в режимі опалення. Нижчі температури зовнішнього повітря призводять до зменшення COP повітряних теплових насосів. Крім цього, вища температура теплоносія (55...60 °C) у режимі ГВП призводить до значного зниження SCOP теплових насосів, значення якого коливається 2,53 до 3,2.

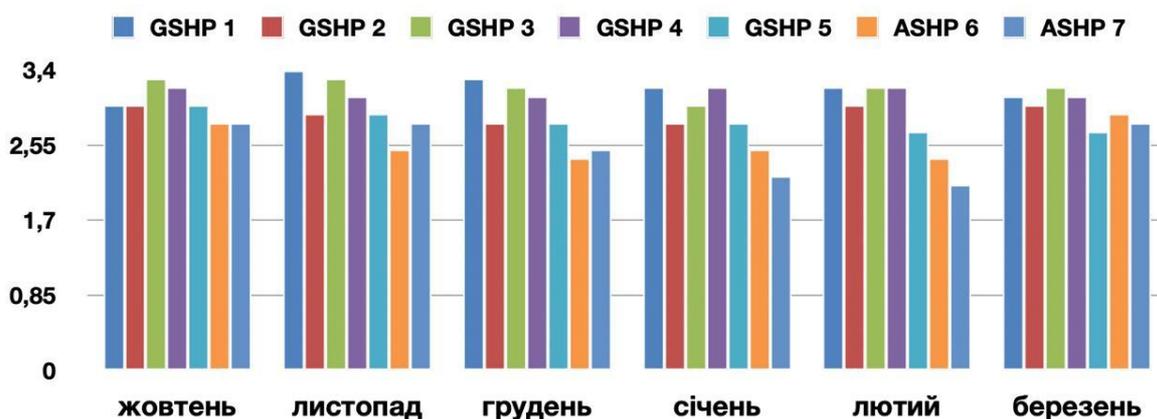


Рис. 3. Дані аналізу SCOP у режимі ГВП геотермальних і повітряних теплових насосів (локація – Київ)

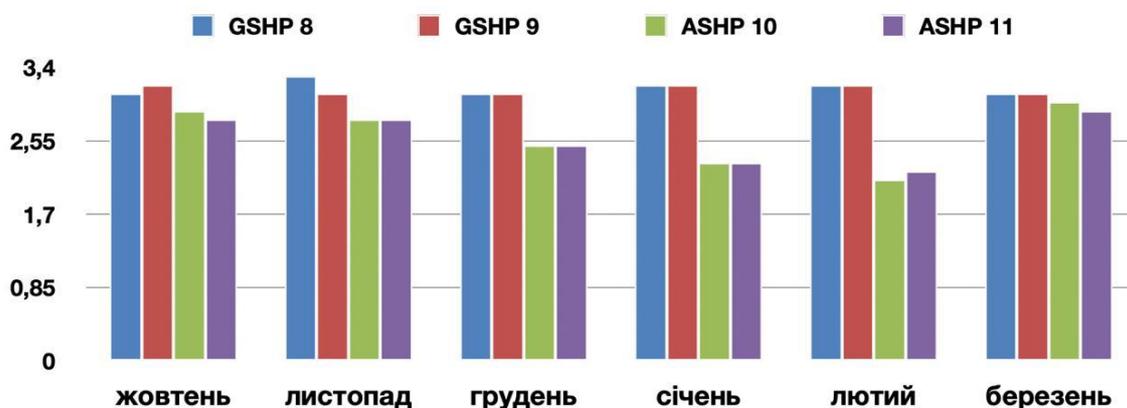


Рис. 4. Дані аналізу SCOP в режимі ГВП геотермальних і повітряних теплових насосів (локація – Львів)

Аналіз даних, наведених у табл. 3, чітко показує вплив конфігурації системи опалення на ефективність роботи теплових насосів. Завдяки використанню низькотемпературних поверхневих систем досягаються високі показники SCOP. У той час, як традиційні опалювальні пристрої (радіатори, конвектори) потребують температури теплоносія вище 45 °С, поверхневі системи (тепла підлога, стінові та стельові панелі) забезпечують комфортні умови всередині будівель, використовуючи теплоносій з температурою 30...35 °С.

Таблиця 3 – Таблиця даних енергоефективності теплових насосів у розрізі конфігурації системи опалення

№	Регіон	Тип ТН	Теплова потужність	Тип системи опалення	SCOP опалення	Т.сер. опалення, °С	Частка роботи додаткового нагрівача, %
<i>Геотермальні теплові насоси</i>							
1	Київ	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	5,17	31,5	0
4	Київ	GSHP	17,3 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни	4,52	40,2	0
5	Київ	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + радіатори + конвектори	3,85	43,6	7
8	Львів	GSHP	42,4 кВт (при В0/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	5,0	33,4	0
<i>Повітряні теплові насоси</i>							
6	Київ	ASHP	26,8 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	4,02	33,6	8
7	Київ	ASHP	16 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + радіатори	3,53	43,8	17
10	Львів	ASHP	13,4 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + радіатори	3,63	41,4	14
11	Львів	ASHP	26,8 кВт (при А2/W35)	Тепла підлога + стіни + стельові панелі	4,08	32,1	9

Наприклад, об’єкт № 1 з геотермальним тепловим насосом, потужністю 42,4 кВт оснащено теплою підлогою, теплими стінами та стельовими панелями, які можуть працювати в режимах опалення та охолодження. Завдяки такій конфігурації системи, середня температура теплоносія протягом опалювального сезону складає 31,5 °С, що дало змогу забезпечити SCOP - 5,17. Така низькотемпературна система опалення дозволяє досягати тепловому насосу COP на рівні 6,2 (рис. 5).

Така ж висока ефективність спостерігається на об’єкті № 8, де аналогічний геотермальний тепловий насос, потужністю 42,4 кВт, працює в комбінації з теплою підлогою, стіновими та стельовими панелями. Таке поєднання забезпечило SCOP - 5,0. А COP на цьому об’єкті досягав - 6,9 (рис. 6).

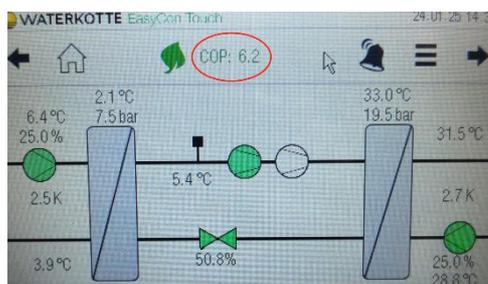


Рис. 5. Фото поточного значення COP геотермального теплового насоса об’єкта № 1. Дата: 24.01.2025

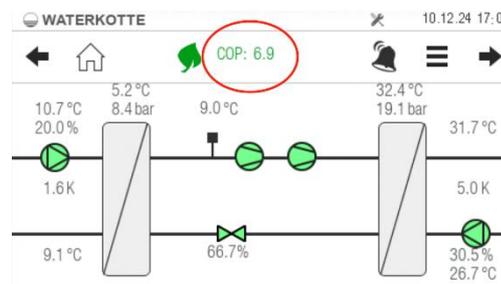


Рис. 6. Фото поточного значення COP геотермального теплового насоса об’єкта № 8. Дата: 10.12.2024

З іншого боку, геотермальний тепловий насос з об'єкта № 5, потужністю 42,4 кВт, працює в комбінації з радіаторами та конвекторами, що потребує вищої температури теплоносія - 43,6 °С. І як наслідок, спостерігаємо значно нижче значення SCOP - 3,85.

Схожа залежність простежується і для повітряних теплових насосів. Об'єкти 6 та 11, що обладнані низькотемпературною системою опалення, мають SCOP на рівні 4,02-4,08. У той час як у проєктах 7 та 10, де використовуються радіатори, значення SCOP 3,53-3,63.

У проєктах, де використовуються радіатори та конвектори, які потребують вищої температури теплоносія, частіше використовується додатковий нагрів. Наприклад, частка додаткового нагріву на об'єктах 7 та 10, що використовують комбінацію повітряних теплових насосів та стандартних опалювальних приладів, в середньому складає 17 % та 14 %. Навіть у системах з геотермальними тепловими насосами, наприклад, об'єкт № 5, в яких використовуються радіатори та конвектори, зростає необхідність додаткового нагріву для підвищення температури теплоносія.

**Висновки.** Проведений аналіз роботи теплових насосів демонструє, що обидва типи теплових насосів (ASHP та GSHP) показують високі показники енергоефективності в умовах експлуатації в Україні.

Геотермальні теплові насоси забезпечують високий SCOP і вплив кліматичних факторів на їх роботу мінімальний під час усього опалювального періоду. Більшою мірою ефективність GSHP залежить від поведінки геотермального поля, температура якого знижується до кінця опалювального сезону.

Водночас ефективність повітряних теплових насосів більшою мірою залежить від зовнішньої температури. SCOP повітряних теплових насосів нижчий в порівнянні з геотермальними тепловими насосами. Проте на початку та в кінці опалювальних сезонів за рахунок того, що зовнішня температура може бути вищою ніж температура геотермального поля, COP ASHP може бути вищим ніж в GSHP.

Кліматичні зміни вже зараз суттєво впливають на ефективність теплових насосів: скорочується тривалість опалювального сезону та підвищуються середні зимові температури. Прогнозується, що до середини 21 століття температура середнього періоду опалення в Україні значно зростає - від 0,8 °С до 1,5 °С. Тривалість періоду опалення буде скорочена в середньому на 15...18 днів. Практично на всій території України середня температура опалювального періоду досягне додатних значень [24]. Таким чином, використання ASHP стає ще більш обґрунтованим. Однак попри такі кліматичні зміни, ефективність GSHP залишається вищою, а їх робота більш стабільною.

Тип конфігурації системи опалення/охолодження є надзвичайно важливим для ефективності роботи теплових насосів. Найвищих показників досягають опалювальні системи з низькотемпературними системами опалення (тепла підлога, стіни, стелі). Наприклад, об'єкти з GSHP та поверхневим опаленням досягали SCOP > 5, у той час як проєкти з радіаторами демонстрували SCOP < 4 і мали більшу частку роботи додаткового нагріву. Згідно з отриманими даними, вартість виробництва 1 кВт·год тепла з геотермальних теплових насосів у поєднанні з низькотемпературною системою опалення може бути до 30% нижчою, ніж у випадку повітряних теплових насосів з класичним опалювальними пристроями (радіатори, конвектори).

Щоб досягти високих показників ефективності теплових насосів, спростити їх впровадження і забезпечити актуальні технічні вимоги, слід переглянути значення розрахункових температур зовнішнього повітря та провести їх корегування, виходячи з актуальних та прогнозованих змін клімату. Заходи для зниження споживання енергії, зокрема поєднання теплових насосів і поверхневих систем, є важливим кроком для побудови стійких систем.

#### Список використаних джерел

1. International Energy Agency. (n.d.). *Energy system of Ukraine*. <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>.

2. Karp, I. M., Nikitin, Ye. Ye., Pyanykh, K. Ye., Sigal, O. I., Dubovskyi, S. V., Heletukha, H. H., Tarnovskyi, M. V., Dutka, O. V., Zubenko, V. I., Komkov, I. S., Oliinyk, Ye. M., Paderno, D. Yu., Pyanykh, K. K., Sylakin, O. E., Stepanov, M. V., & Fedorenko, V. M. (2020). *Stan ta shliakhy rozvytku system tsentralizovanoho teplopostachannia v Ukraini* (Kn. 1). Naukova Dumka; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Gas, Institute of Engineering Thermophysics.
3. Lämmle, M., Metz, J., Kropp, M., Wapler, J., Oltersdorf, T., Günther, D., Herkel, S., & Bongs, C. (2023). Heat pump systems in existing multifamily buildings: A meta-analysis of field measurement data focusing on the relationship of temperature and performance of heat pump systems. *Energy Technology*, 11(6), Article 2300379. <https://doi.org/10.1002/ente.202300379>.
4. Bayer, D. R., & Pruckner, M. (2024). Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings: Carbon emission reductions and economic viability. *Applied Energy*, 373, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123823>.
5. Mukhtar, M., Ameyaw, B., Yimen, N., Zhang, Q., Bamisile, O., Adun, H., & Dagbasi, M. (2021). Building retrofit and energy conservation/efficiency review: A techno-enviro-economic assessment of heat pump system retrofit in housing stock. *Sustainability*, 13(2), 983. <https://doi.org/10.3390/su13020983>.
6. Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management*, 299, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>.
7. Eurobserv'ER. (2024, October). *Heat Pumps Barometer*. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-heat-pumps-barometers>.
8. European Heat Pump Association. (2024). *European heat pump market and statistics report 2024*. [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary\\_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf).
9. Stanytsina, V., Horskyi, V., Danyliv, S., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Maevsky, O., Garbuz, I., & Artemchuk, V. (2025). Comparative analysis of levelized cost of heat in implemented and calculated heat supply systems with heat pumps in Ukraine. *Energies*, 18(5), 1110. <https://doi.org/10.3390/en18051110>
10. REF.org.ua. (2023). *Ринкові дослідження потенціалу зменшення впливу ОРР та ФПГ для теплових насосів і торговельного холодильного обладнання в Україні*. <https://ref.org.ua/upload/iblock/d20/Doslidzhennya-ukrayins`kogo-rynku-u-sektori-RACHP.pdf>
11. Salhein, K., Salheen, S. A., Annekaa, A. M., Hawsawi, M., Alhawsawi, E. Y., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2025). A comprehensive review of geothermal heat pump systems. *Processes*, 13(7), 2142. <https://doi.org/10.3390/pr13072142>
12. Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(2), 53–79. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>
13. Eurostat. (2024, June). *Heating and cooling degree days – Statistics*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/92378.pdf>
14. Погода в аеропортах України. <https://ua.iviao.aero/resources/weather/airports>
15. Kutbay Sezen, A., & Gungor, A. (2022). Performance analysis of air source heat pump according to outside temperature and relative humidity with mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 263, 115702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115702>
16. Дерій, В., Тесленко, О., & Соколовська, І. (2024). Фінансові перешкоди впровадженню тепл, ових насосів в централізованому теплопостачанні. *Системні дослідження в енергетиці*, (3 (79), 4-12. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>.
17. Arghand, T., Javed, S., & Dalenbäck, J.-O. (2023). Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Energy and economic analysis. *Energy*, 270, 126944. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126944>.
18. StatBase. (n.d.). *Number of hot days (T > 30°C) | Ukraine*. <https://statbase.org/data/ukr-number-of-hot-days-max-30c>.
19. Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2010). ДСТУ Б В.2.5-44:2010. *Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами*. Київ.

20. Арсеньєв, В. М., & Мелейчук, С. С. (2018). *Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник*. Суми: Сумський державний університет.
21. Bogdanov, D., Satymov, R., & Breyer, C. (2024). Impact of temperature dependent coefficient of performance of heat pumps on heating systems in national and regional energy systems modelling. *Applied Energy*, 371, 123647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123647>.
22. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*, 8, 609–627. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9312-4>.
23. Білодід, В. Д., & Станиціна, В. В. (2020). Оцінка ефективності вироблення теплової енергії теплонасосними станціями на основі теплоти низькотемпературних підземних вод за методологією повних енергетичних витрат. *Системні дослідження в енергетиці*, 3(62), 46–52. <https://doi.org/10.15407/page2020.03.046>.
24. Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., & Shpytal, T. M. (2019). Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(6), 144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>.

### References

1. International Energy Agency. (n.d.). *Energy system of Ukraine*. <https://www.iea.org/countries/ukraine/efficiency-demand>.
2. Karp, I. M., Nikitin, Ye. Ye., Pyanykh, K. Ye., Sigal, O. I., Dubovskyi, S. V., Heletukha, H. H., Tarnovskyi, M. V., Dutka, O. V., Zubenko, V. I., Komkov, I. S., Oliinyk, Ye. M., Paderno, D. Yu., Pyanykh, K. K., Sylakin, O. E., Stepanov, M. V., & Fedorenko, V. M. (2020). *Stan ta shliakhy rozvytku system tseentralizovanoho teplopostachannia v Ukraini* (Kn. 1). Naukova Dumka; National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Gas, Institute of Engineering Thermophysics.
3. Lämmle, M., Metz, J., Kropp, M., Wapler, J., Oltersdorf, T., Günther, D., Herkel, S., & Bongs, C. (2023). Heat pump systems in existing multifamily buildings: A meta-analysis of field measurement data focusing on the relationship of temperature and performance of heat pump systems. *Energy Technology*, 11(6), Article 2300379. <https://doi.org/10.1002/ente.202300379>.
4. Bayer, D. R., & Pruckner, M. (2024). Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings: Carbon emission reductions and economic viability. *Applied Energy*, 373, 123823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123823>.
5. Mukhtar, M., Ameyaw, B., Yimen, N., Zhang, Q., Bamisile, O., Adun, H., & Dagbasi, M. (2021). Building retrofit and energy conservation/efficiency review: A techno-environ-economic assessment of heat pump system retrofit in housing stock. *Sustainability*, 13(2), 983. <https://doi.org/10.3390/su13020983>.
6. Klute, S., Budt, M., van Beek, M., & Doetsch, C. (2024). Steam generating heat pumps – Overview, classification, economics, and basic modeling principles. *Energy Conversion and Management*, 299, 117882. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117882>.
7. Eurobserv'ER. (2024, October). *Heat Pumps Barometer*. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-heat-pumps-barometers/>.
8. European Heat Pump Association. (2024). *European heat pump market and statistics report 2024*. [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary\\_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2024/08/Executive-summary_EHPA-heat-pump-market-and-statistic-report-2024-2.pdf).
9. Stanytsina, V., Horskyi, V., Danyliv, S., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Maevsky, O., Garbuz, I., & Artemchuk, V. (2025). Comparative analysis of levelized cost of heat in implemented and calculated heat supply systems with heat pumps in Ukraine. *Energies*, 18(5), 1110. <https://doi.org/10.3390/en18051110>.
10. REF.org.ua. (2023). *Ринкові дослідження потенціалу зменшення впливу ОРР та ФПГ для теплових насосів і торговельного холодильного обладнання в Україні*. <https://ref.org.ua/upload/iblock/d20/Doslidzhennya-ukrayins`kogo-rynku-u-sektori-RACHP.pdf>.
11. Salhein, K., Salhein, S. A., Annekaa, A. M., Hawsawi, M., Alhawsawi, E. Y., Kobus, C. J., & Zohdy, M. (2025). A comprehensive review of geothermal heat pump systems. *Processes*, 13(7), 2142. <https://doi.org/10.3390/pr13072142>.
12. Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2024). A century-long tendency of change in surface air temperature on the territory of Ukraine. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(2), 53–79. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i2.297227>.

13. Eurostat. (2024, June). *Heating and cooling degree days – Statistics*. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/92378.pdf>.
14. Pohoda v aeroportakh Ukrainy. [Weather in the airports of Ukraine] <https://ua.ivao.aero/resources/weather/airports>.
15. Kutbay Sezen, A., & Gungor, A. (2022). Performance analysis of air source heat pump according to outside temperature and relative humidity with mathematical modeling. *Energy Conversion and Management*, 263, 115702. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115702>.
16. Derii, V., Teslenko, O., & Sokolovska, I. (2024). Finansovi pereshkody vprovadzhenniu tepl, ovykh nasosiv v tscentralizovanomu teplopostachanni [Financial barriers to the introduction of heat pumps in centralised heat supply.] *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – Systemic research in energy*, 3(79), 4-12. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>.
17. Arghand, T., Javed, S., & Dalenbäck, J.-O. (2023). Combining direct ground cooling with ground-source heat pumps and district heating: Energy and economic analysis. *Energy*, 270, 126944. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126944>.
18. StatBase. (n.d.). *Number of hot days ( $T > 30^{\circ}\text{C}$ ). Ukraine*. <https://statbase.org/data/ukr-number-of-hot-days-max-30c>.
19. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy. (2010). DSTU B V.2.5-44:2010. [Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine. (2010). DSTU B V.2.5-44:2010]. *Proektuvannia system opalennia budivel z teplovymy nasosamy*. Kyiv. - Designing heating systems for buildings with heat pumps. Kyiv.
20. Arseniev, V. M., & Meleichuk, S. S. (2018). *Teplovi nasosy: osnovy teorii i rozrakhunku* [Heat pumps: fundamentals of theory and calculation]. *Sumskiy derzhavnyi universytet – Symu State University*.
21. Bogdanov, D., Satymov, R., & Breyer, C. (2024). Impact of temperature dependent coefficient of performance of heat pumps on heating systems in national and regional energy systems modelling. *Applied Energy*, 371, 123647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123647>.
22. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*, 8, 609–627. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9312-4>.
23. Bilodid, V. D., & Stanytsina, V. V. (2020). Otsinka efektyvnosti vyroblennia teplovoi enerhii teplonasosnymy stantsiiamy na osnovi teploty nyzkotemperaturnykh pidzemnykh vod za metodolohiieiu povnykh enerhetychnykh vytrat. [Assessment of the efficiency of heat production by heat pump stations based on low-temperature groundwater heat using the total energy consumption methodology.] *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – System reserch in the energy sector*, 3(62), 46–52. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.046>.
24. Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., & Shpytal, T. M. (2019). Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century. *Geofizicheskyy Zhurnal*, 41(6), 144–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190072>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025

UDC 697.3:697.9:620.9

**Serhii Danyliv<sup>1</sup>, Pavlo Gusiev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate Student

General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [sergiy@hajster.com](mailto:sergiy@hajster.com). **ORCID** <https://orcid.org/0009-0009-9842-5501>

<sup>2</sup>Postgraduate Student

General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [gusiev@hajster.com](mailto:gusiev@hajster.com). **ORCID** <https://orcid.org/0009-0003-1354-5181>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF AIR-SOURCE AND GROUND-SOURCE HEAT PUMPS INSTALLED IN UKRAINE

*The paper presents a comparative analysis of two major heat pump technologies—air-to-water (ASHP) and ground-to-water (GSHP)—based on real operational data from systems installed in Ukraine. For a representative monitoring period, time series of thermal output, electricity consumption, source/sink temperatures, and control parameters were collected, enabling the calculation of COP and SCOP and their comparison across different heat emission systems (radiators/underfloor*

heating/fan-coils) and operating modes (heating/cooling). The results show an average SCOP of 4.8 for GSHPs and 3.8 for ASHPs. The dominant efficiency driver is the heating-system supply temperature: low-temperature heat distribution reduces the temperature lift and increases SCOP by 20–30%.

The study further examines how the expected increase in the average heating-season ambient temperature improves seasonal ASHP performance and reduces operation under extreme low-temperature conditions, supporting wider ASHP deployment. At the same time, longer and more frequent hot periods increase cooling demand and provide additional advantages for GSHPs due to the possibility of natural cooling (NC) with minimal electricity use. Practical recommendations are formulated for heat pump technology selection, hydraulic configuration, and control settings considering climate trends and real operating conditions in Ukraine. It is shown that elevated supply temperatures and heat pump oversizing lead to frequent cycling and SCOP degradation; for ASHPs, additional losses are associated with defrost cycles under high humidity. Weather-compensated control and the use of buffer/thermal storage are recommended to stabilize operating regimes and mitigate electrical peak loads.

**Keywords:** ground-source heat pumps; air-source heat pumps; COP; SCOP; low-temperature heating systems.

Fig.: 6. Table: 3. References: 24.