

УДК 697.11:621.577

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/22>**Лавріщев О.О.**<https://orcid.org/0000-0002-0051-3039>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Новосилецький Ю.Л.<https://orcid.org/0009-0005-3856-8990>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

Логвінов Г.С.<https://orcid.org/0000-0002-4406-3367>

Житомирський агротехнічний фаховий коледж

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ РІЗНИХ ТИПІВ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОВНІШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У роботі проведено порівняльний аналіз енергетичної ефективності трьох типів теплових насосів (повітря-вода, ґрунт-вода, вода-вода) протягом добового циклу роботи в умовах коливання температури зовнішнього повітря від -5°C до $+3^{\circ}\text{C}$. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоносіїв та посиленням вимог до енергоефективності будівель, що вимагає обґрунтованого вибору оптимального типу теплового насоса з урахуванням кліматичних умов та економічних факторів. Виконано імітаційне моделювання роботи систем з урахуванням реальних характеристик обладнання та теплового навантаження будівлі потужністю 10 кВт при температурі розрахунковій -20°C . Для кожного типу теплового насоса проаналізовано динаміку зміни коефіцієнта ефективності (COP), споживання електричної потужності та теплової потужності протягом доби. Результати моделювання показали, що тепловий насос типу вода-вода демонструє найвищий середній COP 4.65, ґрунт-вода – 4.14, повітря-вода – 2.79. Встановлено, що повітряні теплові насоси характеризуються значними коливаннями ефективності (від 2.0 до 3.88) залежно від температури зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні системи демонструють стабільну роботу з коливаннями менше 3%. Добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) на 91% перевищує споживання системи вода-вода (25.8 кВт·год) при однаковому тепловому навантаженні. Отримані результати дозволяють обґрунтовано підходити до вибору типу теплового насоса для конкретних кліматичних умов та вимог до стабільності теплопостачання. Для регіонів з помірним кліматом при температурах вище -5°C повітряні теплові насоси є економічно виправданим рішенням, тоді як для стабільного цілолітнього теплопостачання перевагу мають геотермальні та гідротермальні системи.

Ключові слова: тепловий насос, COP, енергоефективність, опалення, тепла підлога, моделювання.

Постановка проблеми. Зростання вартості енергоносіїв та посилення вимог до енергоефективності будівель зумовлюють необхідність впровадження сучасних систем опалення. Теплові насоси є одним із найперспективніших рішень для забезпечення теплового комфорту з мінімальним споживанням первинної енергії.

Вибір оптимального типу теплового насоса залежить від кліматичних умов, характеристик будівлі та економічних факторів. Особливо важливим є дослідження роботи теплових насосів в умовах змінної температури зовнішнього

середовища, що характерно для перехідних сезонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання енергетичної ефективності теплових насосів різних типів є предметом інтенсивних досліджень протягом останніх десятиліть. Дослідження показують, що коефіцієнт ефективності (COP) теплових насосів істотно залежить від температури джерела низькопотенціального тепла та погодних умов. Порівняльний аналіз повітряних та геотермальних систем, проведений у Південній Кореї, виявив, що COP геотермальних теплових



насосів варіюється від 3.45 до 4.80 із середнім значенням 4.18, тоді як повітряні системи демонструють значно більшу залежність від зовнішніх умов [1]. Аналогічні результати отримано в дослідженні японських систем опалення теплиць, де COP гідротермальних насосів становив 4.0-5.7 (в середньому 4.9), що суттєво перевищує показники повітряних систем (2.2-4.5 із середнім 3.4) [2].

Важливість сезонного коефіцієнта ефективності (SCOP) як більш реалістичного показника продуктивності підкреслюється в багатьох дослідженнях. Ochsner [3] у комплексному керівництві з проектування геотермальних теплових насосів наголошує на перевагах стабільних джерел тепла, що забезпечують SCOP до 5.8 для сучасних систем із інверторним керуванням. Експериментальні дослідження в холодному кліматі Канади та Латвії показали, що повітряні теплові насоси досягають сезонних показників SPF лише 2.3-3.5, тоді як геотермальні системи забезпечують SPF 3.9 і вище [4, 5].

Методологія імітаційного моделювання теплових насосів розвивається у напрямку підвищення точності прогнозування динамічних характеристик систем. Дослідження з використанням програмного середовища TRNSYS та Modelica демонструють можливість точного відтворення поведінки теплових насосів при змінних навантаженнях та температурних режимах [6, 7]. Особливу увагу приділено моделюванню роботи повітряних теплових насосів в умовах обмерзання випарника, що критично впливає на їх ефективність при від'ємних температурах [8]. Сучасні підходи з використанням машинного навчання та IoT-моніторингу дозволяють створювати високоточні предиктивні моделі COP на основі реальних експлуатаційних даних [9].

Постановка завдання. Провести порівняльну оцінку енергетичної ефективності теплових насосів різних типів протягом добового циклу роботи. Виконати імітаційне моделювання добового циклу роботи при змінній температурі зовнішнього повітря. Визначити коефіцієнт ефективності (COP) кожного типу теплового насоса в динаміці. Провести розрахунки споживання електроенергії та теплової потужності систем

Виклад основного матеріалу. Для проведення моделювання маємо наступні вихідні параметри будівлі: розрахункове теплове навантаження - 10 кВт при температурі зовнішнього повітря -20°C ; внутрішня температура приміщення: 20°C ; система розподілу тепла - тепла підлога; температура теплоносія -35°C .

Зовнішнє середовище має наступні вихідні параметри: мінімальна температура (о 6:00) -5°C ; максимальна температура (о 15:00) $+3^{\circ}\text{C}$; характер зміни - синусоїдальний добовий цикл.

Характеристики теплових насосів за типом:

Повітря-вода:

– Джерело низькопотенціального тепла: атмосферне повітря

– COP при -5°C : 2.0

– COP при $+3^{\circ}\text{C}$: 3.5

– Залежність COP від температури: лінійна

Ґрунт-вода (геотермальний):

– Джерело низькопотенціального тепла: ґрунтовий масив

– Температура ґрунту: стабільна, 9°C

– COP: 4.0-4.5

– Залежність COP від зовнішньої температури: мінімальна

Вода-вода (гідротермальний):

– Джерело низькопотенціального тепла: підземні води

– Температура води: стабільна, 11°C

– COP: 4.5-5.0

– Залежність COP від зовнішньої температури: відсутня

При проведенні моделювання розраховуються наступні показники за формулами і заносяться до таблиці 1, а саме, -

Теплове навантаження:

$$Q(t) = Q_{\text{розр}} * \frac{(T_{\text{внутр}} - T_{\text{зовн}}(t))}{(T_{\text{внутр}} - T_{\text{розр}})} \quad (3.1)$$

де:

– $Q_{\text{розр}} = 10$ кВт (розрахункове навантаження)

– $T_{\text{внутр}} = 20^{\circ}\text{C}$

– $T_{\text{зовн}}(t) = -1 + 4 \times \sin((t-6) \times \pi / 12) ^{\circ}\text{C}$

– $T_{\text{розр}} = -20^{\circ}\text{C}$

Споживання електроенергії:

$$P_{\text{ел}}(t) = \frac{Q(t)}{COP(t)} \quad (3.2)$$

Добове споживання:

$$E_{\text{доба}} = \sum P_{\text{ел}}(t) * 1 \text{год} \quad (3.3)$$

За результатами проведеного моделювання отримано наступні підсумкові показники по кожному з типів теплових насосів та зведено до таблиці 2 та проведено графічний аналіз результатів (рис. 1. – рис. 3.)

– Тепловий насос повітря-вода демонструє значні коливання COP від 2.0 до 3.88 залежно від температури зовнішнього повітря

– Геотермальний насос ґрунт-вода показує стабільні значення COP в діапазоні 4.08-4.21

Таблиця 1

Зведена таблиця результатів імітаційного моделювання

Година	t зовн., °С	Навант., кВт	Повітря-вода			Грунт-вода			Вода-вода		
			СОР	Спож., кВт	Тепло, кВт	СОР	Спож., кВт	Тепло, кВт	СОР	Спож., кВт	Тепло, кВт
0:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
1:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
2:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
3:00	-5.0	6.25	2.00	3.13	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.37	6.25
4:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
5:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
6:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
7:00	-2.0	5.50	2.56	2.14	5.50	4.13	1.33	5.50	4.64	1.19	5.50
8:00	-0.1	5.03	2.92	1.72	5.03	4.16	1.21	5.03	4.66	1.08	5.03
9:00	1.9	4.53	3.31	1.37	4.53	4.18	1.08	4.53	4.69	0.97	4.53
10:00	3.5	4.13	3.59	1.15	4.13	4.19	0.98	4.13	4.70	0.88	4.13
11:00	4.5	3.88	3.78	1.03	3.88	4.21	0.92	3.88	4.71	0.82	3.88
12:00	4.9	3.78	3.86	0.98	3.78	4.21	0.90	3.78	4.72	0.80	3.78
13:00	5.0	3.75	3.88	0.97	3.75	4.21	0.89	3.75	4.72	0.79	3.75
14:00	4.9	3.78	3.86	0.98	3.78	4.21	0.90	3.78	4.72	0.80	3.78
15:00	4.5	3.88	3.78	1.03	3.88	4.21	0.92	3.88	4.71	0.82	3.88
16:00	3.5	4.13	3.59	1.15	4.13	4.19	0.98	4.13	4.70	0.88	4.13
17:00	1.9	4.53	3.31	1.37	4.53	4.18	1.08	4.53	4.69	0.97	4.53
18:00	-0.1	5.03	2.92	1.72	5.03	4.16	1.21	5.03	4.66	1.08	5.03
19:00	-2.0	5.50	2.56	2.14	5.50	4.13	1.33	5.50	4.64	1.19	5.50
20:00	-3.5	5.88	2.28	2.58	5.88	4.11	1.43	5.88	4.61	1.28	5.88
21:00	-4.5	6.13	2.09	2.93	6.13	4.09	1.50	6.13	4.59	1.34	6.13
22:00	-4.9	6.25	2.01	3.11	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.36	6.25
23:00	-5.0	6.25	2.00	3.13	6.25	4.08	1.53	6.25	4.58	1.37	6.25

Таблиця 2

Підсумкові показники теплових насосів

Тип теплового насосу	Середній коефіцієнт ефективності (СОР)	Добове споживання електроенергії, кВт·год	Вироблено теплової енергії, кВт·год
Повітря-вода	2.79	49.4	120.0
Грунт-вода	4.14	29.0	120.0
Вода-вода	4.65	25.8	120.0

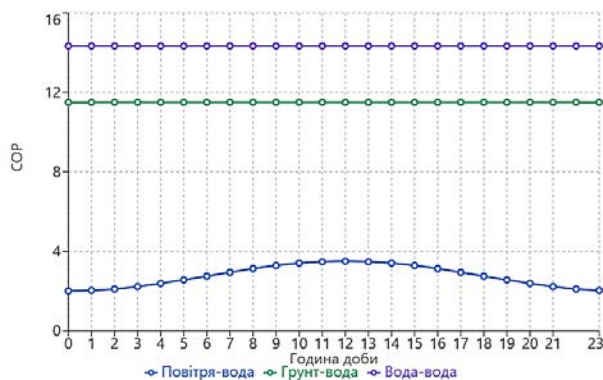


Рис. 1. Зміна коефіцієнта ефективності (COP) протягом доби

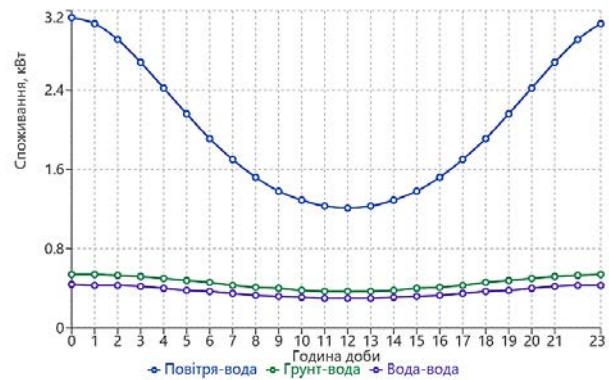


Рис. 2. Споживання електричної потужності протягом доби

- Гідротермальний насос вода-вода має найвищі та найстабільніші показники COP 4.58-4.72
- Максимальне споживання спостерігається в ранкові (3-6 год) та вечірні (21-24 год) години при низьких температурах
- Тепловий насос повітря-вода споживає до 3.13 кВт в пік навантаження
- Геотермальний насос: до 1.53 кВт
- Гідротермальний насос: до 1.37 кВт

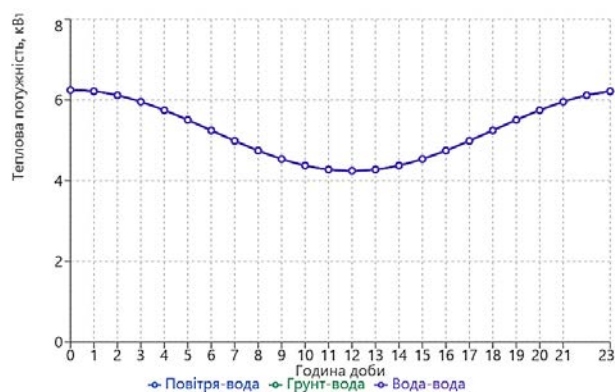


Рис. 3. Теплова потужність систем

- Всі три типи теплових насосів забезпечують однакову теплову потужність відповідно до навантаження будівлі
- Максимальна потужність 6.25 кВт при температурі -5°C
- Мінімальна потужність 3.75 кВт при температурі $+5^{\circ}\text{C}$

Найвищу енергетичну ефективність протягом усього добового циклу демонструє тепловий насос типу вода-вода з середнім COP 4.65, що на 67% вище порівняно з повітряним тепловим насосом (COP 2.79).

Геотермальний тепловий насос ґрунт-вода показує проміжні результати з COP 4.14, що на 48% ефективніше повітряного теплового насоса.

Добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) майже вдвічі перевищує споживання гідротермального насоса (25.8 кВт·год) та на 70% більше споживання геотермального насоса (29.0 кВт·год).

Така різниця пояснюється значним зниженням COP повітряного теплового насоса при від'ємних температурах зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні насоси працюють з стабільним джерелом тепла.

Ключовою перевагою геотермальних та гідротермальних теплових насосів є стабільність їх роботи незалежно від температури зовнішнього повітря. Коливання COP становить менше 3% протягом доби, тоді як для повітряного теплового насоса цей показник сягає 94%.

Висновки. Проведено імітаційне моделювання роботи теплових насосів трьох типів протягом добового циклу в умовах коливання температури від -5°C до $+3^{\circ}\text{C}$ та встановлено, що тепловий насос типу вода-вода має найвищий середній COP 4.65, ґрунт-вода – 4.14, повітря-вода – 2.79. Підтверджено, що повітряні теплові насоси характеризуються значними коливаннями ефективності (від 2.0 до 3.88) залежно від температури зовнішнього повітря, тоді як геотермальні та гідротермальні системи демонструють стабільну роботу. Встановлено, що добове споживання електроенергії теплового насоса повітря-вода (49.4 кВт·год) на 91% перевищує споживання системи вода-вода (25.8 кВт·год) при однаковому тепловому навантаженні.

Список літератури:

1. Wang W., Zare A. Performance simulation and analysis of a solar-assisted multifunctional heat pump system for residential buildings. *International Journal of Sustainable Energy*. 2024. Vol. 43. Article 2394116. P. 1-15 DOI: <https://doi.org/10.1080/14786451.2024.2394116>
2. Furuno S., Okushima L., Sase S. Comparison of coefficient of performance (COP) between an underground water source heat pump system and an air source heat pump system for greenhouse heating in cold and snowy areas in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*. 2016. Vol. 72, No. 3–4. P. 173–177 DOI: <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-15-00029>
3. Ochsner K. *Geothermal Heat Pumps: A Guide for Planning and Installing*. Earthscan, London, 2007. 368p. P. 45-78.
4. Wang F., You T., Cui H. Multi-objective optimization and evaluation of the building-integrated photovoltaic/thermal-energy pile ground source heat pump system. *Applied Energy*. 2024. Vol. 371. Article 123653. P. 1-14 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123653>
5. Bagarella G., Lazzarin R.M., Noro M. Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 485–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.089>
6. Klein S.A., Beckman W.A., Duffie J.A. *TRNSYS – A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2023.

7. Ahmed K., Pyly P., Kurnitski J. Experimental study and modeling of ground-source heat pumps with combi-storage in buildings. *Energies*. 2018. Vol. 11, No. 5. Article 1174. P. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051174>.
8. Ma J., Kim D., Braun J.E., Horton W.T. Development and validation of a dynamic modeling framework for air-source heat pumps under cycling of frosting and reverse-cycle defrosting. *Energy*. 2023. Vol. 268. Article 126750. P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126750>
9. Ayoola R.B., Ilori O.M. Data-driven optimisation of residential air-to-water heat pump performance using IoT and machine learning. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 329. Article 114825. P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.114825>
10. Енергоефективність будівель. Методи розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні: ДСТУ Б EN ISO 52016-1:2019.
11. Системи опалення будинків. Проектування, монтування та експлуатування систем теплових насосів: ДСТУ Б EN 15450:2019.
12. Ground Source Heat Pump Association. *Thermal Characteristics of the Ground. Technical Manual*, 2023.
13. European Heat Pump Association. *Large Scale Heat Pumps in Europe. Market Report 2024*.

Lavrishchev O.O., Novosyletsky Yu.L., Logvinov G.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF DIFFERENT TYPES OF HEAT PUMPS UNDER VARIABLE OUTDOOR TEMPERATURE CONDITIONS

This study presents a comparative analysis of the energy efficiency of three types of heat pumps (air-to-water, ground-to-water, and water-to-water) over a 24-hour operating cycle under conditions where the outdoor air temperature fluctuates between -5°C and $+3^{\circ}\text{C}$. The relevance of this study stems from rising energy costs and stricter requirements for the energy efficiency of buildings, which necessitates a well-founded selection of the optimal type of heat pump, taking into account climatic conditions and economic factors. Simulation modelling of the systems' operation was carried out, taking into account the actual characteristics of the equipment and the thermal load of the building, which is 10 kW, at a design temperature of -20°C . For each type of heat pump, the dynamics of changes in the coefficient of performance (COP), electrical power consumption and thermal power consumption over a 24-hour period were analysed. The simulation results showed that the water-to-water heat pump had the highest average COP of 4.65, followed by the ground-to-water heat pump at 4.14 and the air-to-water heat pump at 2.79. It was found that air-source heat pumps are characterised by significant fluctuations in efficiency (ranging from 2.0 to 3.88) depending on the outdoor air temperature, whereas geothermal and hydrothermal systems demonstrate stable operation with fluctuations of less than 3%. The daily electricity consumption of an air-to-water heat pump (49.4 kWh) is 91% higher than that of a water-to-water system (25.8 kWh) under the same thermal load. The results obtained allow for a well-founded approach to selecting the type of heat pump for specific climatic conditions and requirements for the stability of heat supply. In regions with a temperate climate, where temperatures exceed -5°C , air-source heat pumps are a cost-effective solution, whereas geothermal and hydrothermal systems are preferable for a stable, year-round heat supply.

Keywords: heat pump, COP, energy efficiency, heating, underfloor heating, modelling.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026