ISSN 2786-7102 (Online), ISSN 2786-7633 (Print)
https://doi.org/10.15407/srenergy2025.04.029

УДК 167.7; 004.81

Володимир Мамалига[1]*, канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0001-5922-4066
Angela Jin[2], https://orcid.org/0009-0005-6523-0936
Дар'я Клебан[1], https://orcid.org/0009-0005-9920-9908
Yu Qiang[2], https://orcid.org/0009-0003-6515-3737
[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна;
[2]Zhejiang Omnipotent Spring Machine Co., Ltd., 198, Zheduan Road, Pukou Street, Shaoxing, Zhejiang, China
*Автор-кореспондент: v.mamalyga@gmail.com

АЛЬТЕРНАТИВНІ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ В УМОВАХ ФІНЛЯНДІЇ

Анотація. *Станом на сьогодні майже 50 % будівель у Фінляндії, переважно у містах, підключено до систем централізованого теплопостачання. Втім зростає роль автономних джерел теплопостачання, зокрема теплових насосів та сонячних теплових колекторів, що використовуються як ефективна альтернатива традиційним технологіям опалення. У роботі представлено комплексний техніко-економічний аналіз доцільності використання альтернативних систем опалення та проаналізовано ефективність застосування теплових насосів та сонячних колекторів в умовах Фінляндії. Показано, що визначальними під час вибору обладнання є кліматичні особливості регіону, зокрема тривалий опалювальний сезон та низькі температури, а також низька сонячна активність взимку. Аналіз показує, що європейське обладнання програє за економічними показниками китайським аналогам, тобто для проєктів з обмеженим бюджетом або в умовах нестабільної економічної ситуації китайські теплові насоси можуть стати кращим вибором. Ефективність сонячних колекторів у фінському кліматі, незважаючи на їхню екологічну привабливість, є обмеженою через недостатню кількість сонячних днів, особливо в зимовий період. Проте їхнє використання може бути доцільним у комбінації з іншими джерелами енергії, такими як теплові насоси. Такий підхід дозволяє оптимізувати енергоспоживання та знизити навантаження на основну систему опалення в літній період. Вакуумні колектори демонструють кращу продуктивність у холодну пору року порівняно з плоскими, що робить їх більш прийнятним варіантом для Фінляндії. Такий підхід є особливо актуальним для будівель, які не підключені до централізованих систем теплопостачання, а також для новозведених об'єктів, де можна реалізувати сучасні енергоефективні рішення «з нуля». Метою статті є проведення техніко-економічного аналізу перспективності використання теплових насосів і сонячних колекторів з урахуванням вартості грошей в умовах Фінляндії. При цьому проведено порівняльний аналіз показників використання обладнання, виготовленого в Європі та Китаї, як таких, що мають різну вартість.*

Ключові слова: теплові насоси, сонячні колектори, сумарні дисконтовані доходи, вартість грошей, економічна доцільність.

1. Вступ

Фінляндія належить до країн із суворими кліматичними умовами та тривалим опалювальним сезоном, що зумовлює значний попит на теплову енергію. Як наслідок, рівень споживання енергії на душу населення у Фінляндії є одним з найвищих серед країн Європейського Союзу [1].

У відповідь на виклики, пов'язані з кліматичними змінами, держава запровадила амбітну кліматичну політику. Згідно з оновленою редакцією Закону про зміну клімату, ухваленою у 2022 році, Фінляндія взяла на себе зобов'язання досягти вуглецевої нейтральності до 2035 року. Для досягнення цієї мети ключовими напрямами визначено підвищення енергоефективності будівельного фонду,

поступове виведення з експлуатації систем, що працюють на викопному паливі, та широке впровадження відновлюваних джерел енергії з одночасною електрифікацією опалення [2].

Особлива увага надається трансформації будівельного сектору, в якому відбувається масштабна заміна традиційних нафтових котлів на більш екологічно чисті системи, зокрема теплові насоси. Завдяки активному впровадженню цих технологій Фінляндія посідає провідні позиції серед країн світу за темпами поширення теплових насосів, а частка викопного палива в структурі енергопостачання країни за 2021 рік становила лише близько 36 %, що є одним із найнижчих показників серед країн-членів Організації економічного співробітництва та розвитку [3, 4].

Станом на сьогодні майже 50 % будівель у Фінляндії, переважно у містах, підключено до систем централізованого теплопостачання [5]. Втім зростає роль автономних джерел теплопостачання, зокрема теплових насосів та сонячних теплових колекторів, що використовуються як ефективна альтернатива традиційним технологіям опалення.

Фінляндія, як і інші скандинавські країни, має значний досвід експлуатації цих систем. Зокрема, теплові насоси активно використовуються для отримання теплової енергії з навколишнього середовища – повітря, води та ґрунту. Сонячні теплові колектори застосовуються для підігріву води та забезпечення теплопостачання. Попри проблеми з теплопостачанням впродовж зимового періоду застосування сонячних колекторів дає змогу суттєво зменшити споживання викопного палива та підвищити енергоефективність; покращити екологічні характеристики систем теплопостачання [6, 7].

З огляду на зростаючі вимоги до декарбонізації енергетичного сектору та необхідність адаптації до суворих кліматичних умов, дослідження потенціалу альтернативних автономних систем опалення є актуальним і важливим завданням у контексті сталого розвитку енергетики Фінляндії.

У роботі було проаналізовано ефективність застосування теплових насосів та сонячних колекторів в умовах Фінляндії з урахуванням їхньої ефективності та вартості.

Метою статті є проведення техніко-економічного аналізу перспективності використання теплових насосів і сонячних колекторів з урахуванням вартості грошей в умовах Фінляндії. При цьому проведено порівняльний аналіз показників використання обладнання, виготовленого в Європі та Китаї.

2. Специфіка застосування теплових насосів та сонячних колекторів у Фінляндії

2.1. Теплові насоси

Фінляндія є одним із світових лідерів у впровадженні теплових насосів, які стали важливою складовою стратегії декарбонізації країни. Станом на 2022 рік у Фінляндії встановлено понад 1,4 млн теплових насосів, що виробляють понад 12 ТВт·год щорічно та забезпечують близько 20 % теплопостачання країни [8].

Переважна частина встановлених у Фінляндії теплових насосів – повітряно-водяні системи, частка яких сягає близько 80 % від загальної кількості. Теплові насоси активно впроваджуються в різних секторах: вони використовуються як у багатоквартирних житлових будинках і торгових об’єктах, так і в індивідуальному житловому будівництві. Зокрема, в нових односімейних будинках їх встановлюють у понад 75 % випадків. У старому житловому фонді теплові насоси дедалі частіше замінюють традиційні системи на основі спалювання мазуту або централізованого теплопостачання [9, 10].

Згідно з прогнозами, до 2030 року кількість теплових насосів у країні зросте до 2 млн, а обсяги виробництва сягатимуть 22 ТВт·год на рік. У контексті загальнодержавної стратегії досягнення вуглецевої нейтральності до 2035 року урядом поставлено амбітну ціль – забезпечити виробництво теплової енергії тепловими насосами на рівні 35 ТВт·год на рік. Динаміка розвитку цієї галузі свідчить про реалістичність та досяжність окресленої мети та перспективність використання теплових насосів у Фінляндії [11].

Перспективність застосування теплових насосів проаналізуємо на прикладі двох моделей теплових насосів повітря-вода різних виробників**: Daikin Altherma 3 R** виробництва Німеччини та **GREE GRS-CQ6.0Pd/Na-K** виробництва Китаю.

Daikin Altherma 3 R – тепловий насос повітря-вода, у якому використовують технологію та холодоагент R-32, що забезпечує високий коефіцієнт трансформації (coefficient of performance − COP) навіть за низьких температур. За стандартних умов коефіцієнт трансформації цієї системи становить 5,1, а максимальна температура води на виході – 65 °C. Серед ключових переваг – енергоефективність, низька вартість експлуатаційних витрат, низький рівень шуму та розширена функціональність керування [12].

Модель GREE GRS-CQ6.0Pd/Na-K розроблена з акцентом на баланс між вартістю й функціональністю. Номінальний COP цієї системи становить близько 4,1, а максимальна температура води на виході − 40−80 °C. Такі теплові насоси стабільно працюють у діапазоні зовнішніх температур від −20 °C до +43 °C і обладнані автоматичною системою розморожування, що забезпечує ефективність їхньої експлуатації в умовах частих відлиг. Вбудований циркуляційний насос дозволяє забезпечити нормальну роботу без додаткових зовнішніх насосів [13].

Порівняння технічних характеристик і експлуатаційних параметрів цих моделей засвідчує, що Daikin Altherma 3 R є доцільним вибором для об’єктів, розташованих в умовах жорсткого клімату, оскільки забезпечує високі показники продуктивності та надійності. Водночас слід враховувати її більшу вартість. З іншого боку, модель GREE GRS-CQ6.0Pd/Na-K характеризується меншою функціональною складністю та дещо нижчими показниками ефективності, проте відрізняється меншою ціною та спрощеним монтажем.

2.2 Сонячні колектори

Ефективність сонячного колектора залежить від інтенсивності сонячного опромінення, кута падіння променів та конструктивних особливостей пристрою [14]. Існують два основні типи сонячних колекторів: плоскі та вакуумні. Плоский колектор складається з абсорбера у вигляді металевої пластини з теплопровідними трубками, прозорого покриття (зазвичай загартованого скла) та теплоізоляційного шару. Він ефективний у теплому кліматі, але має вищі тепловтрати за низьких температур. Вакуумний колектор складається з ряду скляних трубок, усередині яких створено вакуум для мінімізації втрат тепла. Така конструкція забезпечує кращу ефективність у холодну пору року за слабкого сонячного опромінення [15].

Фінляндія є північною країною, тому можуть виникати сумніви щодо доцільності використання сонячних колекторів. Втім, досвід країни засвідчує достатній інсоляційний потенціал, особливо в літній період [16]. Так, станом на 2023 рік загальна встановлена площа колекторів у Фінляндії перевищує 6400 м², що забезпечує приблизно 4,5 МВт теплової потужності.

Впровадження сонячних колекторів на об’єктах з системою водяного опалення може забезпечити до 50 % річної потреби в гарячій воді та 25–35 % від загальної потреби в теплопостачанні при їх інтеграції з тепловими насосами або біоенергетичними установками. Поєднання кількох технологій дозволяє оптимізувати режим роботи системи, рівномірно розподіляючи навантаження та зменшуючи експлуатаційні витрати впродовж усього року. Це може підвищити загальну енергоефективність та покращити екологічні характеристики будівель [17, 18].

Проаналізуємо доцільність використання сонячних колекторів на прикладі двох моделей.

Вакуумний трубчастий колектор Kingspan Thermomax HP400-30 з «dry-fit» тепловими трубками (30 штук), завдяки яким монтаж і заміна окремої трубки не потребують зливу гліколю. Вакуум майже повністю усуває теплові втрати, а вбудований обмежувач температури захищає систему від перегріву. Колектор може забезпечити до 70 % річної потреби в гарячій воді [19].

Китайську альтернативу являє Sunrain TZ58/1800-30R, який теж має 30 теплових трубок, але виробник застосовує селективне покриття «3-Hi», яке підвищує поглинання сонячної енергії. Колектор витримує робочий тиск 8 бар і комплектується легким алюмінієвим каркасом. Ціна є суттєво нижчою, що робить цю модель привабливою для проєктів із обмеженим бюджетом [20].

3. Методи та матеріали

3.1. Розрахункові формули

Для визначення економічної доцільності використання теплових насосів та сонячних колекторів було розроблено розрахункові формули, наведені у розділах 2.1.1. та 2.1.2.

3.1.1. Сумарні дисконтовані доходи

Для визначення економічної доцільності використання теплових насосів та сонячних колекторів у кліматичних умовах Фінляндії було проведено аналіз сумарних дисконтованих доходів (СДД) за 10-річний період експлуатації. Такий аналіз являє собою оцінку економічної ефективності впровадження технологій з урахуванням змін грошових потоків впродовж періоду експлуатації. Дисконтування дозволяє привести майбутні доходи та витрати до початку реалізації проєкту, тим самим враховуючи вплив можливої зміни вартості грошей та інших економічних чинників [21].

Основною метою аналізу є визначення сумарних дисконтованих доходів, тобто інвестицій в обладнання, з урахуванням усіх витрат на їхнє придбання, установку, обслуговування, а також доходів від зменшення витрат на енергоспоживання (доходів від компенсації витрачання електроенергії на виробництво теплової енергії). Такий підхід дозволяє отримати об'єктивну картину економічної доцільності запровадження альтернативної системи теплопостачання (теплові насоси, сонячні колектори) для споживача, що є надзвичайно важливим під час порівняння варіантів альтернативних систем опалення [22, 23].

Під час проведення аналізу перспективності проєктів зазвичай застосовують формулу для визначення чистої теперішньої вартості (Net Present Value − NPV). Часто використовують інші терміни – сумарні дисконтовані доходи, інтегральна дисконтована вартість, чиста інтегральна дисконтована вартість тощо [24]. В подальшому у статті будемо використовувати термін «сумарні дисконтовані доходи».

Перевагу слід надавати тому проєкту, який має більше значення сумарних дисконтованих доходів впродовж терміну його реалізації.

Для розрахунку СДД під час використання теплових насосів було розроблено формулу:

$$C = -\frac{C_{start}}{(1+i)^0} + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^1} + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^2} + \ldots + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^T}, \quad (1)$$

де: C – сумарні дисконтовані доходи (€); C_{start} – початкова вартість насоса (витрати на придбання обладнання та проведення його монтажу) (€); P – електрична потужність, яку споживає тепловий насос (кВт); Q_{hp} – теплова енергія, яку отримуємо від теплового насоса (кВт·год); i – вартість грошей (відн. од.); t – кількість годин роботи теплового насоса за рік (год/рік); T – період експлуатації (років); T_{el} – тариф (ціна) електроенергії (€/кВт·год); T_t – тариф на теплову енергію (€/кВт·год); C_{annual} – щорічні витрати на обслуговування (€).

Слід зважати, що під час детального економічного аналізу вартість грошей (cost of money; інколи використовують термін ставка дисконтування) визначається як середньозважене значення власного та запозиченого капіталів, а також з урахуванням інфляції тощо. В подальших розрахунках використовуємо узагальнене значення вартості грошей без деталізації за складовими, оскільки це не є завданням цієї роботи [25]. Звісно, вартість грошей для проєктів, які можна реалізовувати у Фінляндії, навряд чи буде перевищувати 0,15–0,20 відн. од. (15–20%).

Для розрахунку сумарних дисконтованих доходів під час використання сонячних колекторів було розроблено формулу:

$$C = -\frac{C_{start}}{(1+i)^0} + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^1} + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^T}, \quad (2)$$

де: C – дисконтовані сумарні доходи (€); C_{start} – початкова вартість колектора (обладнання і монтаж) (€); C_{annual} – щорічні витрати на обслуговування (регулярна перевірка, заміна теплоносія) (€); i – вартість грошей (відн. од.); T – період експлуатації (років); Q_{sc} – теплова енергія, яку отримуємо від сонячного колектора (кВт·год); T_t – тариф на теплову енергію (€/кВт·год).

3.1.2. Середня собівартість теплової енергії протягом життєвого циклу проєкту LCOH (Levelized Cost of Heat)

З метою більш коректного порівняння техніко-економічних показників проєктів з використанням теплових насосів та сонячних колекторів доцільно порівнювати LCOH. Для розрахунку LCOH, що отримуємо від теплового насоса (C_{hp}), було розроблено формулу

$$C_{hp} = \left(-\frac{C_{start}}{(1+i)^0} + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^1} + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^2} + \ldots + \frac{-C_{annual} - P \cdot t \cdot T_{el} + Q_{hp} \cdot T_t}{(1+i)^T}\right) / Q_{hp}, \quad (3)$$

де: C_{hp} – питома вартість теплової енергії (€/кВт·год); C_{start} – початкова вартість насоса (витрати на придбання обладнання та проведення його монтажу) (€); P – електрична потужність, яку споживає тепловий насос (кВт); Q_{hp} – теплова енергія, яку отримуємо від теплового насоса (кВт·год); i – вартість грошей (відн. од.); t – кількість годин роботи теплового насоса за рік (год/рік); T – період експлуатації (років); T_{el} – тариф (ціна) електроенергії (€/кВт·год); T_t – тариф на теплову енергію (€/кВт·год); C_{annual} – щорічні витрати на обслуговування (€).

Для розрахунку LCOH, що отримуємо від сонячного колектора (C_{sc}), було розроблено формулу

$$C_{sc} = \frac{\left(-\frac{C_{start}}{(1+i)^0} + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^1} + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^2} + \cdots + \frac{-C_{annual} + Q_{sc} \cdot T_t}{(1+i)^T}\right)}{Q_{sc}}, \quad (4)$$

де: C_{sc} – середня собівартість теплової енергії протягом життєвого циклу проєкту, що отримуємо від сонячного колектора (€/кВт·год); C_{start} – початкова вартість колектора (обладнання і монтаж) (€); C_{annual} – щорічні витрати на обслуговування (регулярна перевірка, заміна теплоносія) (€); i – вартість грошей (відн. од.); T – період експлуатації (років); Q_{sc} – теплова енергія, яку отримуємо від сонячного колектора (кВт·год); T_t – тариф на теплову енергію (€/кВт·год).

3.2 Кліматичні умови Фінляндії

Розрахунки виконано для кліматичних умов столиці Фінляндії – Гельсінкі. Таке рішення дозволяє отримати результати, враховуючи специфіку місцевого сонячного опромінення та температурного режиму.

Для розрахунку продуктивності сонячних колекторів треба враховувати річну тривалість сонячного опромінення. За статистикою, середньорічна тривалість сонячного світла становить майже 1840 годин [26]. На рис. 1 представлено середньомісячну тривалість сонячного опромінення в місті Гельсінкі.

Для оцінки продуктивності теплового насоса необхідно враховувати річну кількість годин його роботи, яка залежить від температурних умов довкілля. З цією метою було проведено аналіз щоденних температурних даних за 2015 рік, отриманих з бази Фінського метеорологічного інституту [27].

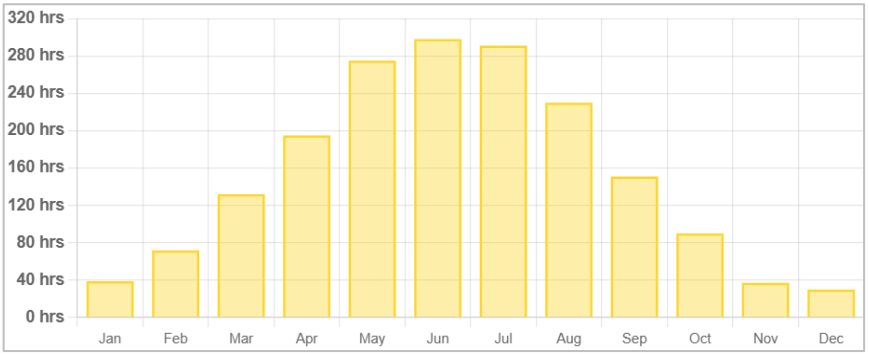


Рисунок 1. Середньомісячна кількість сонячних годин у Гельсінкі [26]

На основі середньодобових температур визначено періоди, протягом яких зовнішня температура знижувалася нижче встановленого порогу, необхідного для активації системи опалення. Середньодобова температура розраховувалася як середнє арифметичне між максимальними та мінімальними значеннями температури протягом доби.

Для обчислення кількості годин роботи теплового насоса було застосовано метод агрегування: підраховано кількість днів, у які виникала потреба в опаленні, після чого цей показник множився на 24 години. Таким чином отримано орієнтовне значення загальної тривалості річної експлуатації системи.

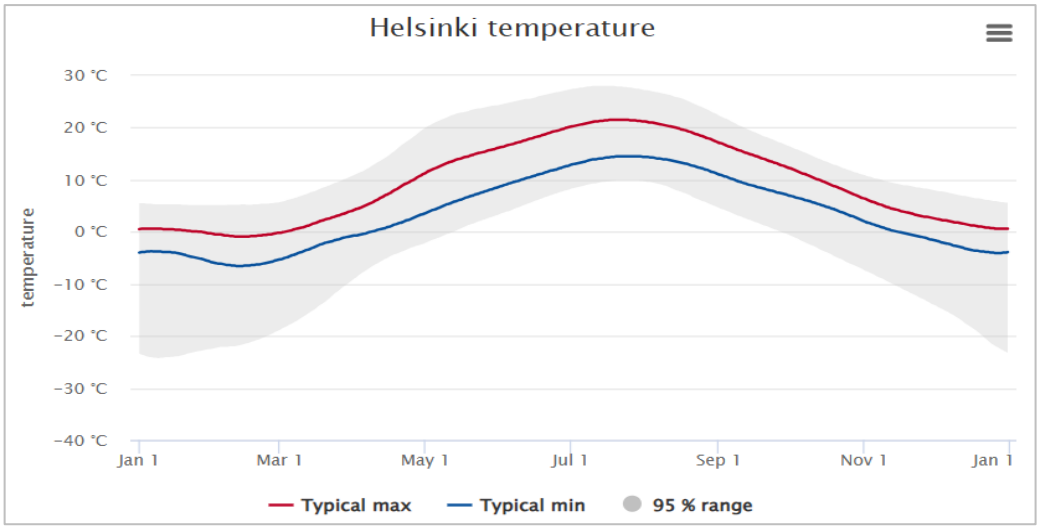


Рисунок 2. Графік температур за 2015 рік по місту Гельсінкі [27]

3.3 Параметри роботи обладнання для розрахунків

Теплова потужність теплового насоса розраховується за формулою

$$Q_{hp} = COP \cdot P_{hp}, \tag{5}$$

де: Q_{hp} – теплова потужність (кВт) – кількість тепла, яке генерує тепловий насос; COP – коефіцієнт трансформації – ефективність роботи теплового насоса; P_{hp} – електрична потужність, яку споживає тепловий насос (кВт) [28].

За даними виробника, тепловий насос Daikin Altherma 3 R має такі показники:

– номінальна теплова потужність: Q_{base} = 8 кВт;
– коефіцієнт трансформації: COP_{base} = 5,1.

Таким чином, згідно з попередньою формулою електричну потужність, яку споживає тепловий насос, можна визначити за формулою

$$P_{base} = \frac{Q_{base}}{COP_{base}}, \tag{6}$$

$$P_{base} = \frac{8}{5.1} = 1.57 \text{ кВт}.$$

Це означає, що за стандартних умов тепловий насос споживає 1,57 кВт електроенергії для генерації 8 кВт теплової енергії.

Теплова енергія, яку виробляє сонячний колектор, розраховується за формулою

$$Q_{sc} = P_{sc} \cdot t, \tag{7}$$

де: Q_{sc} – теплова енергія, яку виробляє сонячний колектор; P_{sc} – середня очікувана потужність сонячного колектора; t – кількість годин роботи сонячного колектора за рік.

Середня очікувана потужність сонячного колектора впродовж життєвого циклу розраховується за формулою

$$P_{sc} = \frac{P_{nom} \cdot t}{8760}, \tag{8}$$

$$P_{sc} = \frac{8 \cdot 1840}{8760} = 1{,}68 \text{ кВт},$$

де: P_{sc} – середня очікувана потужність сонячного колектора; P_{nom} – номінальна потужність сонячного колектора; t – кількість годин роботи сонячного колектора за рік.

Число 8760 використано у знаменнику формули (8) як загальна кількість годин у році.

З урахуванням наведеного вище було створено таблиці даних 1 та 2 для обчислення сумарних дисконтованих доходів та LCOH для теплових насосів і сонячних колекторів.

У таблиці 1 представлено інформацію для теплового насоса.

Таблиця 1. Вхідні дані для обчислень для теплового насоса

Параметр	Позначення	Значення	Джерело
Початкова вартість	C_{start}	9000 €	[12]
Щорічні витрати на обслуговування	C_{annual}	50 €	[12]
Електрична потужність (споживання)	P	1.57 кВт	розрахунки
Кількість годин роботи за рік	t	4500 год/рік	розрахунки
Період експлуатації (термін гарантії виробника)	T	10 років	[12]
Тариф на електроенергію	T_{el}	0,17 €/кВт·год	[29]
Тариф на теплову енергію	T_t	0,15 €/кВт·год; 0,2 €/кВт·год	[30]
Вартість грошей (розрахунковий діапазон)	i	[0,1; 0,7] відн. од.	

У таблиці 2 містяться вхідні дані для сонячного колектора.

Таблиця 2. Вхідні дані для обчислень для сонячного колектора

Параметр	Позначення	Значення	Джерело
Початкова вартість	C_{start}	1500 €	[19]
Щорічні експлуатаційні витрати	C_{annual}	50 €	[19]
Середня очікувана потужність сонячного колектора	P_{sc}	1.68 кВт	розрахунки
Період експлуатації (термін гарантії виробника)	T	10 років	[19]
Кількість годин роботи на рік	*t (для обчислення Q)*	1840 год/рік	[26]
Тариф на теплову енергію	T_t	0,15 €/кВт·год, 0,2 €/кВт·год	[30]
Вартість грошей (розрахунковий діапазон)	i	[0,1; 0,7] відн. од.	

4. Результати

Проведемо комплексний аналіз економічної доцільності використання сонячних колекторів та теплових насосів у кліматичних умовах Фінляндії. Дослідження ґрунтується на порівняльній оцінці ефективності обладнання європейського та китайського виробництва з урахуванням різних рівнів тарифів на теплову енергію.

На рисунках 3 та 4 представлено результати розрахунків СДД (європейське обладнання) залежно від рівня вартості грошей для двох різних тарифів на теплову енергію – 0,15 €/кВт·год і 0,2 €/кВт·год. Слід враховувати, що 0,15 €/кВт·год – середній тариф на теплову енергію у Фінляндії [30], а 0,2 €/кВт·год – підвищений тариф, що передбачає можливе зростання цін у майбутньому. Мета аналізу полягає у порівнянні впливу цих тарифів на сумарні дисконтовані доходи та визначенні оптимального варіанта для подальших розрахунків.

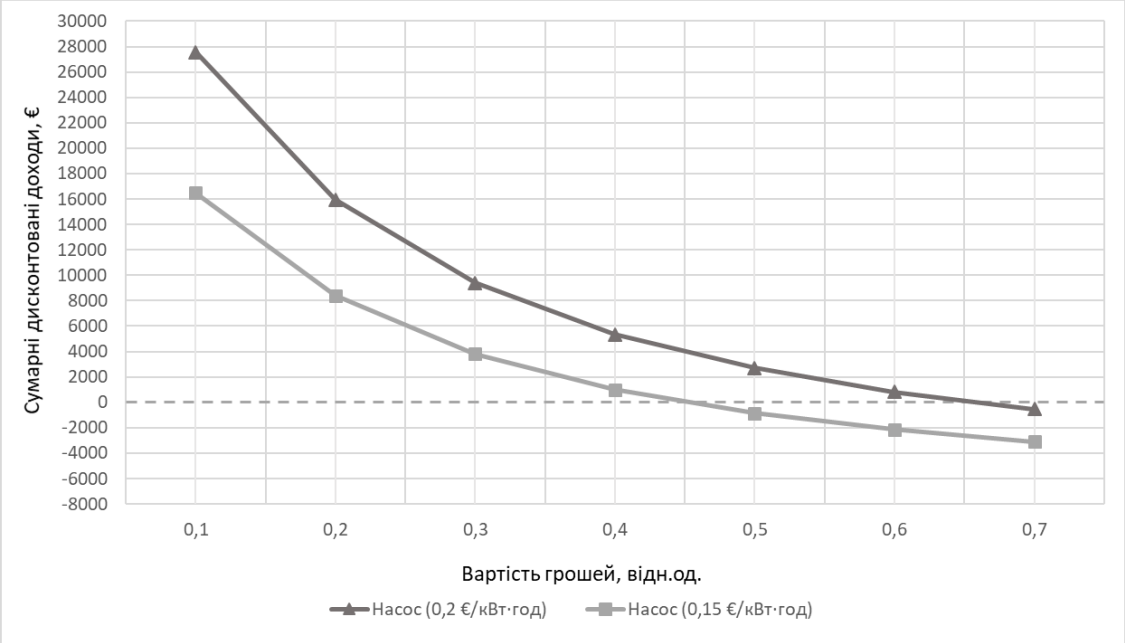


Рисунок 3. Порівняння СДД для теплових насосів за різних тарифів (європейське обладнання)

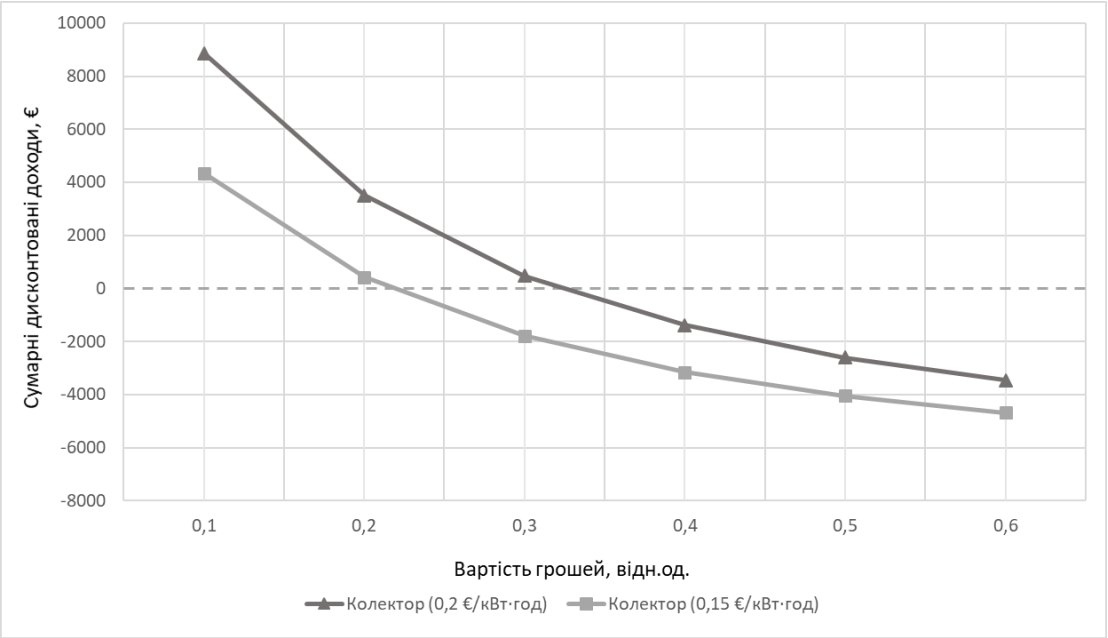


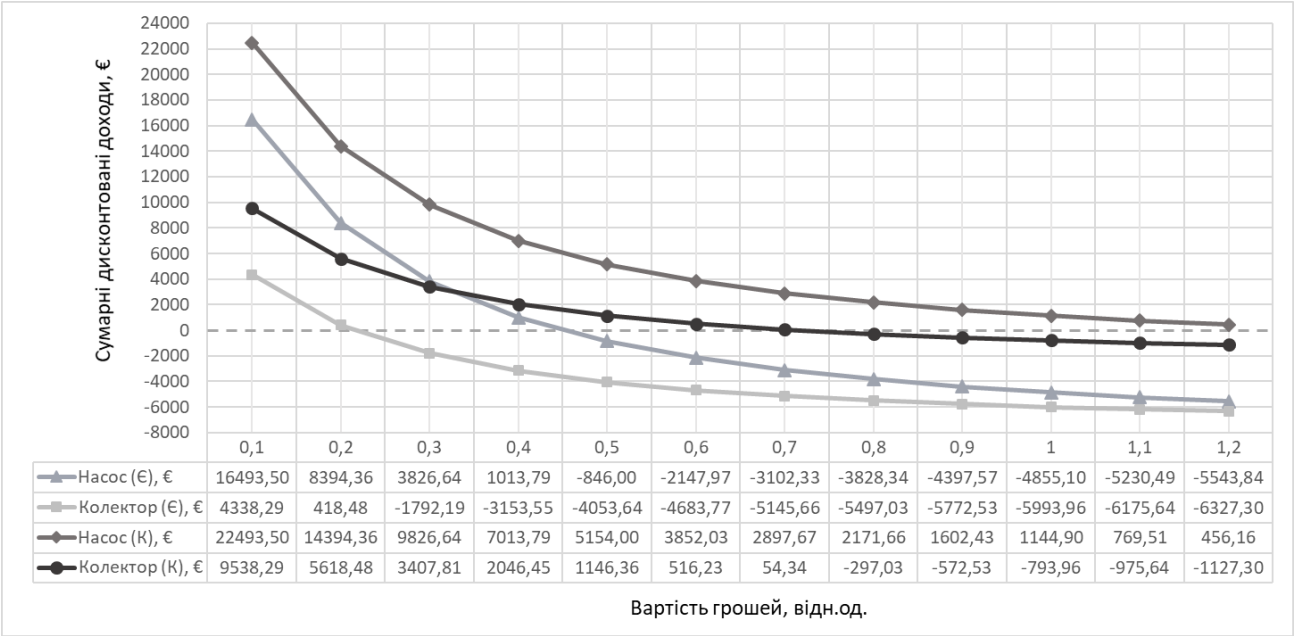
Рисунок 4. Порівняння СДД для сонячних колекторів за різних тарифів (європейське обладнання)

Аналіз залежностей, представлених на рис. 3 та рис. 4, показав, що зі збільшенням вартості грошей, СДД зменшуються. При цьому вищий тариф (0,2 €/кВт·год) забезпечує більші значення СДД з нижчим тарифом (0,15 €/кВт·год) для обох типів обладнання. Це може здаватися дивним, адже збільшення витрат не повинно збільшувати доходи. Проте, якщо проаналізувати таку ситуацію, стає зрозумілим, що доходи від запровадження сонячних колекторів і теплових насосів пов'язані з тим, що за більших тарифів на енергоресурси отримуємо відносно більше грошей як дохід від реалізації проєкту. Це засвідчує, що зростання ціни на енергоресурси робить інвестиції в альтернативні джерела (теплові насоси та сонячні колектори) більш привабливими у довгостроковому контексті. Однак за високої вартостей грошей (понад 60-70 %) сумарні дисконтовані доходи можуть ставати від'ємними, що зменшує економічну доцільність реалізації проєктів альтернативних джерел енергії у довгостроковій перспективі. Втім, враховуючи низьку вартість грошей, яку можна залучити для реалізації проєктів у Фінляндії, цим можна знехтувати.

Проведемо порівняння ефективності обладнання різних виробників. На рис. 5 представлено результати розрахунків сумарних дисконтованих доходів для європейського та китайського обладнання.

Європейські сонячні колектори економічно доцільно використовувати за вартості грошей до 0,23 відн. од. (23 %). На відміну від них, китайські сонячні колектори доцільно використовувати за вартості грошей до 0,85 відн. од. (85 %).

Аналогічна ситуація має місце і для теплових насосів. Економічна доцільність європейських моделей стає негативною (тобто їх використання є економічно недоцільним) у разі перевищення вартості грошей 0,45 відн. од. (45 %). На противагу цьому китайські теплові насоси зберігають економічну доцільність навіть за вартості грошей 1,2 відн. од. (120 %).



	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
Насос (Є), €	16493,50	8394,36	3826,64	1013,79	-846,00	-2147,97	-3102,33	-3828,34	-4397,57	-4855,10	-5230,49	-5543,84
Колектор (Є), €	4338,29	418,48	-1792,19	-3153,55	-4053,64	-4683,77	-5145,66	-5497,03	-5772,53	-5993,96	-6175,64	-6327,30
Насос (К), €	22493,50	14394,36	9826,64	7013,79	5154,00	3852,03	2897,67	2171,66	1602,43	1144,90	769,51	456,16
Колектор (К), €	9538,29	5618,48	3407,81	2046,45	1146,36	516,23	54,34	-297,03	-572,53	-793,96	-975,64	-1127,30

Рисунок 5. Порівняння СДД для китайського (К) та європейського (Є) обладнання

Незважаючи на привабливість високих тарифів, для подальших розрахунків обираємо тариф 0,15 €/кВт·год. Адже його використання найкраще відображає поточні ринкові умови. У Фінляндії, де ціна на теплову енергію змінюється кожне півріччя залежно від сезонного попиту та ринкових умов, використання середнього значення дозволяє отримати більш об’єктивну оцінку без впливу короткострокових коливань. Цей підхід забезпечить стабільність розрахунків і дозволить уникнути перебільшення або применшення потенційних переваг.

На рис. 6 та рис. 7 наведено результати розрахунків LCOH сонячних колекторів (Колектор) та теплових насосів (Насос) європейського і китайського виробництва відповідно.

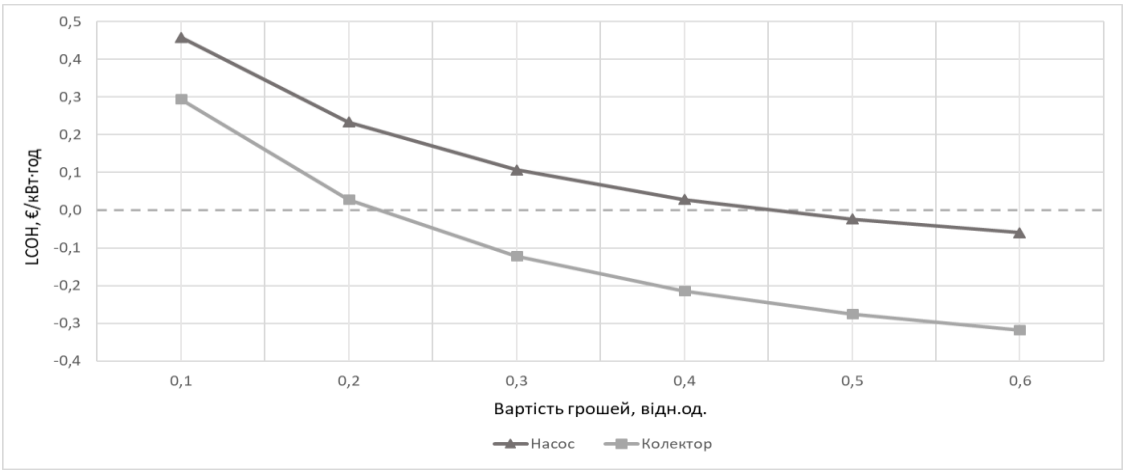


Рисунок 6. Порівняння LCOH сонячних колекторів (Колектор) та теплових насосів (Насос) для європейського обладнання

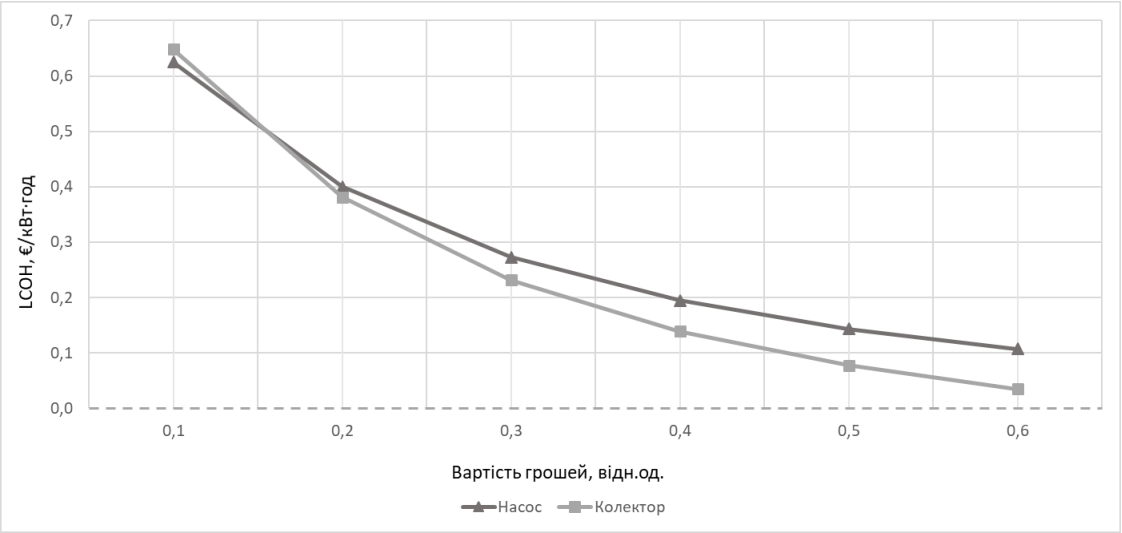


Рисунок 7. Порівняння LCOH сонячних колекторів (Колектор) та теплових насосів (Насос) для китайського обладнання

Аналіз засвідчує більш високу економічну доцільність використання теплових насосів порівняно із сонячними колекторами в умовах Фінляндії. Це пояснюється кліматичними особливостями регіону – обмежена кількість сонячних днів впродовж року та низький рівень інсоляції у зимовий період.

Завдяки нижчим початковим витратам, китайське обладнання показує позитивний фінансовий ефект за більшої вартості грошей.

Проведемо порівняння ефективності обладнання різних виробників.

Європейські сонячні колектори демонструють швидке зниження показників LCOH при зростанні вартості грошей та втрачають економічну доцільність вже за вартості грошей понад 0,23 відн. од. (23 %). На відміну від них, китайські колектори зберігають позитивні значення до вартості грошей понад 0,85 відн. од. (85 %).

Аналогічна ситуація має місце і для теплових насосів. Економічна доцільність європейських моделей стає негативною у разі перевищення вартості грошей 0,45 відн. од. (45 %). На противагу цьому китайські теплові насоси зберігають економічну доцільність навіть за вартості грошей 1,2 відн. од. (120 %).

Отже, китайське обладнання демонструє кращі показники у довгостроковій перспективі. Європейські системи економічно доцільні лише за низької вартості грошей.

5. Обговорення та висновки

Проведені розрахунки дозволяють зробити низку висновків щодо оптимального вибору обладнання для опалення в умовах Фінляндії. Перш за все слід зазначити, що кліматичні особливості регіону, зокрема тривалий опалювальний сезон та низькі температури і низька сонячна активність взимку, роблять теплові насоси більш ефективним рішенням порівняно із сонячними колекторами. Адже теплові насоси забезпечують значно вищу економічну доцільність у довгостроковій перспективі.

Аналіз засвідчує більшу об’єктивність порівняння характеристик на основі середньої собівартості теплової енергії протягом життєвого циклу проєкту. Так, за однакової потужності теплових насосів і сонячних колекторів використання показника LCOH враховує тривалість функціонування теплового насоса і сонячного колектора впродовж року.

Аналіз вибору між європейськими та китайськими моделями теплових насосів показує, що європейське обладнання програє за економічними показниками китайським аналогам. Таким чином,

для проєктів з обмеженим бюджетом або в умовах нестабільної економічної ситуації китайські теплові насоси можуть стати кращим вибором.

Ефективність сонячних колекторів у фінському кліматі, незважаючи на їхню екологічну привабливість, є обмеженою через недостатню кількість сонячних днів, особливо в зимовий період. Проте їхнє використання може бути доцільним у комбінації з іншими джерелами енергії, такими як теплові насоси. Такий підхід дозволяє оптимізувати енергоспоживання та знизити навантаження на основну систему опалення в літній період. Вакуумні колектори демонструють кращу продуктивність у холодну пору року порівняно з плоскими, що робить їх більш прийнятним варіантом для Фінляндії.

Важливим аспектом при виборі обладнання є також можливі зміни тарифів на теплову енергію. У цьому контексті теплові насоси, які забезпечують високий коефіцієнт трансформації, стають оптимальним рішенням для зниження експлуатаційних витрат.

Для досягнення максимальної ефективності рекомендується інтегрувати теплові насоси в комбіновані системи, які поєднують кілька джерел енергії. Наприклад, використання теплових насосів разом із сонячними колекторами дозволяє збалансувати навантаження впродовж року та знизити загальні витрати на енергопостачання. Такий підхід особливо актуальний для будівель, які не підключені до централізованих систем теплопостачання, а також для новозведених об'єктів, де можна реалізувати сучасні енергоефективні рішення «з нуля».

Внесок авторів

Аналіз технологій, написання та редагування тексту, розрахунки, формулювання висновків − Володимир Мамалига; огляд ринку теплових насосів та сонячних колекторів Китаю, аналіз ринкових механізмів − Angela Jin; огляд літератури, ведення розрахунків − Дар'я Клебан; огляд ринку теплових насосів та сонячних колекторів Китаю, аналіз ринкових механізмів − Yu Qiang.

Висловлення подяки

Автори висловлюють вдячність співробітникам та студентам кафедри цифрових технологій в енергетиці НН ІАТЕ, а також співробітникам Інституту загальної енергетики Національної академії наук України за професійні консультації та підтримку, надану під час підготовки цієї роботи.

Посилання

1. Finland Energy Information. Enerdata. URL: https://www.enerdata.net/estore/energy-market/finland (Last accessed: 07.04.2025).
2. Carbon Neutral Finland 2035. Central government debt management. URL: https://www.treasuryfinland.fi/investor-relations/sustainability-and-finnish-government-bonds/carbon-neutral-finland-2035/ (Last accessed: 07.04.2025).
3. IEA. Executive summary: Finland 2023. URL: https://www.iea.org/reports/finland-2023/executive-summary (дата звернення: 09.04.2025).
4. Hirvonen J., Jokisalo J. Sankelo P., Niemelä T., Kosonen R. Emission Reduction Potential of Different Types of Finnish Buildings through Energy Retrofits. *Positive Energy Buildings and Districts*. 2020. Iss. 10. Vol. 12. https://doi.org/10.3390/buildings10120234
5. Abdurafikov R., Grahn E., Kannari L., Ypyä J., Kaukonen S., Heimonen I., Paiho S. An analysis of heating energy scenarios of a Finnish case district. *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 32. P. 56–66. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.015
6. Централізована система теплопостачання по-європейськи. Українська енергетика. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/yevropeitsi-otsinyly-perevahy-tsentralizovanoho-opalennia (дата звернення: 14.04.2025).
7. Kontu K., Rinne S., Junnila S. Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. *Energy*. 2019. Vol. 166. P. 862–870. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077
8. Heat pumps in Finland. URL: https://www.ehpa.org/news-and-resources/news/in-finland-heat-pumps-sales-increased-50-in-2021 (Last accessed: 22.04.2025).
9. Finland: Heat Pump Market Outlook. HPT − Heat Pumping Technologies. URL: https://heatpumpingtechnologies.org/magazine-1-2021/finland-heat-pump-market-outlook (Last accessed: 02.05.2025).

10. Теплові насоси як найкращий варіант для домашнього клімат-контролю. URL: https://www.securities.io/uk/why-are-heat-pumps-touted-as-a-top-option-for-home-climate-control (дата звернення: 09.06.2025).
11. Rehman H., Hirvonen J., Jokisalo J., Kosonen R., Sirén K. EU Emission Targets of 2050: Costs and CO2 Emissions Comparison of Three Different Solar and Heat Pump-Based Community-Level District Heating Systems in Nordic Conditions. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 16. https://doi.org/10.3390/en13164167
12. Daikin Altherma 3 heat pump review and specifications URL: https://www.daikin.fi/content/dam/document-library/catalogues/heat/air-to-water-heat-pump-low-temperature/Daikin_Altherma_3/Daikin%20Altherma%203%20R_ERGA-E_Product%20flyer_ECPEN21-724_English.pdf (Last accessed: 07.05.2025).
13. Тепловий насос GREE GRS-CQ6.0Pd/Na-K. URL: https://hotline.ua/ua/remont-teplovye-nasosy/gree-grs-cq6point0pdna-k (дата звернення: 08.05.2025).
14. Solar Collectors. ESRU. URL: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/zero_emission_bldgs/descripsolarcollectors.htm (Last accessed: 14.05.2025).
15. Вакуумний і плоский сонячний колектор. URL: https://grand-overon.in.ua/alternativnaya-energetika-stati/vakuumniy-ploskiy-sonyachniy-kolektor-yakiy-krasche-uk.html (дата звернення: 14.05.2025).
16. Nordics: solar thermal surface additions by country 2023. URL: https://www.statista.com/statistics/1479760/solar-thermal-surface-additions-by-country-nordics (Last accessed: 15.05.2025).
17. Solar heating. Jäspi. URL: https://jaspi.fi/en/heating/solar-heating/ (Last accessed: 19.05.2025).
18. Wang X., Xia L., Bales C., Zhang X., Copertaro B., Pan S., Wu J. A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 146. P. 2472–2487. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.096
19. Kingspan Thermomax HP400-30. URL: https://kotel-prom.com/komplekt-trub-hewalex-thermomax-hp-400-id-14174 (Last accessed: 21.05.2025).
20. Вакуумний сонячний колектор Sunrain TZ58/1800-30R. Solar-Tech. URL: https://solar-tech.com.ua/ua/solar-power-system/solar-collectors/vakuumnyi-solnechnyi-kollektor-sunrain-tz-30.html (дата звернення: 23.05.2025).
21. Арсеньєв В.М., Мелейчук С.С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2018. 364 с. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/324265556.pdf (дата звернення: 30.05.2025).
22. Босий М., Боса О., Авраменко Є., Герасименко І. Оцінка ефективності використання теплового насоса та традиційних систем теплопостачання. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2023. Вип. 1(138). С. 11–21. https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.1.1
23. Mamalyga V.M., Prytulenko O.O. Feasibility study for the implementation of solar power plants in the USA. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2024. Vol. 27. Iss. 1. P. 67–80. https://doi.org/10.33223/epj/175238
24. Оцінка ефективності проектів. URL: https://buklib.net/books/22886/ (дата звернення: 30.05.2025).
25. Mamalyga V. LED lamps – are they inexpensive and effective? *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2022. Vol. 25. Iss. 3. P. 133–150. https://doi.org/10.33223/epj/152591
26. Average Monthly Sunshine in Helsinki. URL: https://weather-and-climate.com/average-monthly-hours-Sunshine,Helsinki,Finland (Last accessed: 03.06.2025).
27. Finnish Meteorological Institute. Seasons in Finland. URL: https://en.ilmatieteenlaitos.fi/seasons-in-finland (Last accessed: 06.06.2025).
28. Coefficient of Performance (COP). URL: https://testbook.com/physics-formulas/coefficient-of-performance-formula (Last accessed: 09.06.2025).
29. Finland − Electricity prices. URL: https://tradingeconomics.com/finland/electricity-prices-medium-size-households-eurostat-data.html (Last accessed: 16.06.2025).
30. District heat prices. URL: https://www.helen.fi/en/heating/district-heat-prices (Last accessed: 17.06.2025).

References

1. *Finland Energy Information*. Enerdata. Retrieved July 4, 2025, from https://www.enerdata.net/estore/energy-market/finland
2. *Carbon Neutral Finland 2035*. Central government debt management. Retrieved July 4, 2025, from https://www.treasuryfinland.fi/investor-relations/sustainability-and-finnish-government-bonds/carbon-neutral-finland-2035/
3. IEA. *Executive summary: Finland 2023*. Retrieved September 4, 2025, from https://www.iea.org/reports/finland-2023/executive-summary
4. Hirvonen, J., Jokisalo, J. Sankelo, P., Niemelä, T., & Kosonen, R. (2020). Emission Reduction Potential of Different Types of Finnish Buildings through Energy Retrofits. *Positive Energy Buildings and Districts*, *10*(12). https://doi.org/10.3390/buildings10120234

5. Abdurafikov, R., Grahn, E., Kannari, L., Ypyä, J., Kaukonen, S., Heimonen, I., & Paiho, S. (2017). An analysis of heating energy scenarios of a Finnish case district. *Sustainable Cities and Society*, *32*, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.015
6. *Centralized heating system in the European style*. Ukrainian Energy. Retrieved April 14, 2025, from https://ua-energy.org/uk/posts/yevropeitsi-otsinyly-perevahy-tsentralizovanoho-opalennia [in Ukrainian].
7. Kontu, K., Rinne, S., & Junnila, S. (2019). Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. *Energy*, *166*, 862–870. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077
8. Heat pumps in Finland. Retrieved April 22, 2025, from https://www.ehpa.org/news-and-resources/news/in-finland-heat-pumps-sales-increased-50-in-2021
9. *Finland: Heat Pump Market Outlook*. HPT − Heat Pumping Technologies. Retrieved May 2, 2025, from https://heatpumpingtechnologies.org/magazine-1-2021/finland-heat-pump-market-outlook
10. Heat pumps as the best option for home climate control. Retrieved June 9, 2025, from https://www.securities.io/uk/why-are-heat-pumps-touted-as-a-top-option-for-home-climate-control [in Ukrainian].
11. Rehman, H., Hirvonen, J., Jokisalo, J., Kosonen, R., & Sirén, K. (2020). EU Emission Targets of 2050: Costs and CO2 Emissions Comparison of Three Different Solar and Heat Pump-Based Community-Level District Heating Systems in Nordic Conditions. *Energies*, *13*(16). https://doi.org/10.3390/en13164167
12. Daikin Altherma 3 heat pump review and specifications Retrieved May 7, 2025, from https://www.daikin.fi/content/dam/document-library/catalogues/heat/air-to-water-heat-pump-low-temperature/Daikin_Altherma_3/Daikin%20Altherma%203%20R_ERGA-E_Product%20flyer_ECPEN21-724_English.pdf
13. Heat pump GREE GRS-CQ6.0Pd/Na-K. Retrieved May 8, 2025, from https://hotline.ua/ua/remont-teplovye-nasosy/gree-grs-cq6point0pdna-k [in Ukrainian].
14. *Solar Collectors*. ESRU. Retrieved May 14, 2025, from https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/02-03/zero_emission_bldgs/descripsolarcollectors.htm
15. Vacuum and flat solar collector. Retrieved May 14, 2025, from https://grand-overon.in.ua/alternativnaya-energetika-stati/vakuumniy-ploskiy-sonyachniy-kolektor-yakiy-krasche-uk.html [in Ukrainian].
16. Nordics: solar thermal surface additions by country 2023. Retrieved May 15, 2025, from https://www.statista.com/statistics/1479760/solar-thermal-surface-additions-by-country-nordics
17. *Solar heating*. Jäspi. Retrieved May 19, 2025, from https://jaspi.fi/en/heating/solar-heating/
18. Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Copertaro, B., Pan, S., & Wu, J. (2020). A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources. *Renewable Energy*, 146, 2472–2487. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.096
19. Kingspan Thermomax HP400-30. Retrieved May 21, 2025, from https://kotel-prom.com/komplekt-trub-hewalex-thermomax-hp-400-id-14174
20. *Vacuum solar collector Sunrain TZ58/1800-30R*. Solar-Tech. Retrieved May 23, 2025, from https://solar-tech.com.ua/ua/solar-power-system/solar-collectors/vakuumnyi-solnechnyi-kollektor-sunrain-tz-30.html [in Ukrainian].
21. Arseniev, V.M., & Meleichuk, S.S. (2018). *Heat Pumps: Fundamentals of Theory and Calculation*. Sumy State University [in Ukrainian]. Retrieved May 30, 2025, from https://core.ac.uk/download/pdf/324265556.pdf
22. Bosyi, M., Bosa, O., Avramenko, Ye., & Gerasimenko, I. (2023). Assessment of the efficiency of using the heat pump and traditional heat supply systems. *Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"*, *1*(138), 11–21 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.1.1
23. Mamalyga, V.M., & Prytulenko, O.O. (2024). Feasibility study for the implementation of solar power plants in the USA. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, *27*(1), 67–80. https://doi.org/10.33223/epj/175238
24. Project effectiveness assessment. Retrieved May 30, 2025, from https://buklib.net/books/22886/ [in Ukrainian].
25. Mamalyga, V. (2022). LED lamps – are they inexpensive and effective? *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, *25*(3), 133–150. https://doi.org/10.33223/epj/152591
26. Average Monthly Sunshine in Helsinki. Retrieved June 3, 2025, from https://weather-and-climate.com/average-monthly-hours-Sunshine,Helsinki,Finland
27. Finnish Meteorological Institute. *Seasons in Finland*. Retrieved June 6, 2025, from https://en.ilmatieteenlaitos.fi/seasons-in-finland
28. Coefficient of Performance (COP). Retrieved June 9, 2025, from https://testbook.com/physics-formulas/coefficient-of-performance-formula
29. Finland − Electricity prices. Retrieved June 16, 2025, from https://tradingeconomics.com/finland/electricity-prices-medium-size-households-eurostat-data.html
30. District heat prices. Retrieved June 17, 2025, from https://www.helen.fi/en/heating/district-heat-prices

ALTERNATIVE HEATING SYSTEMS FOR BUILDINGS IN FINLAND

Volodymyr Mamalyga[1]*, PhD (Engin.), Associate Professor, https://orcid.org/0000-0001-5922-4066
Angela Jin[2], https://orcid.org/0009-0005-6523-0936
Daria Kleban[1], https://orcid.org/0009-0005-9920-9908
Yu Qiang[2], https://orcid.org/0009-0003-6515-3737
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine;
[2]Zhejiang Omnipotent Spring Machine Co., Ltd., 198, Zheduan Road, Pukou Street, Shaoxing, Zhejiang, China
*Corresponding author: v.mamalyga@gmail.com

Abstract. *There are, almost 50 % of buildings in Finland, mainly in cities, are connected to district heating systems.*
However, the role of autonomous heat sources is growing, in particular heat pumps and solar thermal collectors, which are used as an effective alternative to traditional heating technologies. The paper presents a comprehensive technical and economic analysis of the feasibility of using alternative heating systems (heat pumps and solar collectors) in Finnish conditions. The paper analyzes the effectiveness of using heat pumps and solar collectors in Finnish conditions, taking into account their efficiency and cost. It is shown that the climatic features of the region are decisive when choosing equipment, in particular, a long heating season and low temperatures and low solar activity in winter. The analysis shows that European equipment loses in economic indicators to Chinese counterparts, i.e. for projects with a limited budget or in conditions of an unstable economic situation, Chinese heat pumps may be a better choice. The efficiency of solar collectors in the Finnish climate, despite their environmental attractiveness, is limited due to the insufficient number of sunny days, especially in winter. However, their use may be advisable in combination with other energy sources, such as heat pumps. This approach allows you to optimize energy consumption and reduce the load on the main heating system in the summer. Vacuum collectors demonstrate better performance in the cold season compared to flat ones, which makes them a more acceptable option for Finland. This approach is especially relevant for buildings that are not connected to centralized heating systems, as well as for newly constructed facilities where modern energy-efficient solutions can be implemented "from scratch". The aim of the article is to conduct a feasibility study of the prospects of heat pumps and solar collectors, taking into account the cost of money in Finnish conditions. At the same time, a comparative analysis of the indicators of the use of equipment manufactured in Europe and China, as having different costs, was carried out.
Keywords: heat pumps, solar collectors, total discounted income, cost of money, economic feasibility.

Надійшла до редколегії: 12.07.2025