

УДК 621.577:697.34
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/21>

Ткаченко М.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Риндюк Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

У статті розглянуто проблему зменшення енергоспоживання та викидів парникових газів у житловому секторі вимагає впровадження високоефективних та екологічно безпечних технологій теплопостачання. З огляду на значне зростання цін на традиційні енергоносії та актуальність декарбонізації опалювальних систем, використання теплових насосів є перспективним напрямом модернізації енергетичної інфраструктури. Особливої ваги це питання набуває в умовах кліматичної адаптації та підвищення енергоефективності будівельного фонду.

Показані переваги теплових насосів: високий коефіцієнт перетворення енергії, відсутність шкідливих викидів, гнучкість застосування та довговічність. Водночас визначено й обмеження: висока початкова вартість, зниження ефективності при низьких температурах, потреба в кваліфікованому обслуговуванні та відсутність державної підтримки в Україні.

Окрему увагу приділено екологічним аспектам, зокрема переходу до безпечніших холодоагентів із низьким потенціалом глобального потепління. Метою роботи є оцінка техніко-економічної ефективності застосування повітряного теплового насоса для опалення приватного будинку в умовах помірного клімату України та порівняння його експлуатаційних характеристик із електричним котлом.

У роботі застосовано методи теплотехнічного розрахунку, аналізу енергоспоживання, сезонної динаміки зовнішньої температури, а також техніко-економічного порівняння опалювальних систем за критеріями спожитої енергії, коефіцієнта ефективності та вартості експлуатації.

Проаналізовано технічні характеристики теплового насоса Misco BreeHeat типу «повітря-вода» з номінальною тепловою потужністю 16,2 кВт і результати його практичного застосування у будинку площею 150 м². З урахуванням погодинного розподілу зовнішньої температури для регіону Києва визначено необхідне теплове навантаження в розрізі опалювального періоду. Встановлено, що середній сезонний коефіцієнт ефективності теплового насоса становить 3,14, а загальне енергоспоживання системи з урахуванням пікового навантаження – 8785 кВт·год. При порівнянні з електрокотлом, що споживає 27159 кВт·год за той самий період, економія становить понад 79 тисяч гривень за сезон. Побудовано графік покриття теплових втрат у залежності від температури та визначено точку бівалентності системи. Досліджено умови стабільної роботи обладнання при температурах до -22 °С.

Практична цінність роботи полягає в демонстрації реального потенціалу впровадження теплових насосів у приватному секторі України як альтернативи електричному опаленню. Отримані результати можуть бути використані для попереднього техніко-економічного обґрунтування вибору обладнання, планування інвестицій у термомодернізацію та оптимізації енергоспоживання будівель.

Ключові слова: тепловий насос, система опалення, енергоефективність, повітряне джерело теплоти, коефіцієнт перетворення енергії, енергоспоживання, техніко-економічна оцінка, альтернативне теплопостачання, термомодернізація.

Постановка проблеми. Використання теплових насосів для опалення приміщень, визначення термінів їх окупності та реальної економії при експлуатації на території України.

Однією з ключових проблем ХХІ століття є необхідність мінімізації негативного впливу людської діяльності на довкілля, спричиненого спалюванням викопного палива, такого як

нафта, вугілля та природний газ. Процеси видобутку, переробки, транспортування та згоряння цих ресурсів призводять до викидів парникових газів в атмосферу, що викликає серйозні екологічні наслідки, зокрема екстремальні погодні явища: тривалі посухи, посилення хвиль спеки, збільшення лісових пожеж, інтенсивні опади та затоплення прибережних територій [1, 2]. Для протидії цим загрозам необхідно активно впроваджувати відновлювані джерела енергії. Також умовах зростання вартості традиційних енергоносіїв, посилення вимог до енергоефективності будівель та необхідності скорочення викидів парникових газів особливої актуальності набуває питання впровадження енергоощадних та екологічно безпечних технологій теплопостачання. В приватному житловому секторі України одним із найпоширеніших засобів опалення залишаються електричні котли, застосування яких, незважаючи на технічну простоту, супроводжується високим рівнем споживання електроенергії та обмеженими можливостями щодо підвищення енергоефективності.

У цьому контексті все більше уваги привертають теплові насоси (ТН) як альтернатива традиційним джерелам теплопостачання. Їх впровадження може суттєво зменшити споживання енергії, знизити експлуатаційні витрати та забезпечити відповідність сучасним екологічним стандартам. Проте ефективність роботи теплових насосів значною мірою залежить від кліматичних умов, що зумовлює необхідність аналізу їх доцільності з урахуванням регіональної специфіки.

Таким чином, актуальною є науково обґрунтована оцінка ефективності функціонування систем опалення на базі теплових насосів у порівнянні з електричними котлами в умовах помірного клімату України. Такий аналіз є необхідним для прийняття техніко-економічно доцільних рішень при модернізації систем опалення в приватному секторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показують пряму залежність між зростанням населення, споживанням первинної енергії та рівнем викидів CO₂. Прогнозується, що між 1990 і 2040 роками глобальне енергоспоживання зросте на 136%, а викиди CO₂ – на 110%, що значно перевищує темпи приросту населення (72%). Головною причиною цього є збільшення попиту на енергію на душу населення.

З метою стимулювання використання відновлюваної енергії уряди та міжнародні організації впроваджують різноманітні стратегії та політики. Одним із прикладів є Закон Великобританії про

зміну клімату 2008 року [3], який спрямований на зменшення викидів парникових газів та перехід до більш сталих енергетичних рішень.

Зі зростанням попиту на енергію та підвищеною увагою до використання низькопотенційних джерел теплоти теплові насоси стали однією з ефективних технологій у сфері відновлюваної енергетики. Тепловий насос (ТН) є енергоефективним, екологічним, легким в автоматизації та зручним в експлуатації теплогенеруючим обладнанням, яке з точки зору вибору джерела теплоти є досить гнучким рішенням, що має високий рівень надійності в експлуатації. Такі переваги теплонасосних технологій дали потужний поштовх для їх популярності та впровадження в багатьох країнах світу. На сьогодні в світі встановлено та експлуатується сотні мільйонів ТН, що говорить про їх популярність, надійність, енергетичну та економічну ефективність [4]. Теплові насоси стали ключовою технологією для досягнення кліматичних цілей у ЄС та інших регіонах світу. Починаючи з 2020 року програми Horizon Europe фінансують дослідження з інтеграції теплових насосів із відновлюваними джерелами енергії, а також розробку низькопотенційних геотермальних систем [7]. У США велика увага приділяється модернізації теплових насосів для холодних кліматичних умов, зокрема у північних штатах. Дослідницькі центри за підтримки Міністерства енергетики [8] працюють над удосконаленням двоступеневих і змінночастотних компресорів, що дозволяють досягти вищої сезонної ефективності (SEER, HSPF). Крім того, актуальними є дослідження впливу нових екологічно безпечних холодоагентів із низьким GWP (Global Warming Potential), таких як R-1234yf і CO₂. У Японії провідні компанії, як-от Mitsubishi та Daikin, активно впроваджують інтелектуальні системи керування, що дозволяють оптимізувати роботу теплового насоса в режимі реального часу, використовуючи алгоритми машинного навчання [9]. Таким чином можемо зробити висновок, що теплові насоси мають високий потенціал застосування в енергетиці, а останні дослідження спрямовані на підвищення їх ефективності та інтеграцію в різні системи розумного будинку. Також поширені гібридні конфігурації ТН, що поєднують теплові насоси з традиційними опалювальними системами або іншими відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі [11]. Одну з таких схем розглянуто в статті [12], де для підігріву робочої рідини, в ролі якої виступає 35%-ний водний розчин пропіленгліколю, вико-

ристовують теплоту сонячної радіації, використовуючи змійовик контактного теплообмінника. Розглянемо основні типи теплових насосів, принципи їх роботи та ключові відмінності.

Теплові насоси типу «повітря-вода» використовують енергію з навколишнього повітря та передають її через водяну систему опалення, зокрема через радіатори або теплу підлогу. Системи «повітря-повітря» розподіляють нагріте або охолоджене повітря по приміщеннях за допомогою повітроводів. Повітряні теплові насоси (ASHP) особливо ефективні для міських і щільно забудованих районів, де встановлення ґрунтових систем може бути неможливим [13]. Проте їхня ефективність знижується в умовах сильного холоду або підвищеної вологості [14]. У дослідженні [15] обґрунтовано конструкцію теплових насосів типу «повітря-вода», акцентуючи увагу на їхній простоті встановлення та відсутності необхідності в отриманні спеціальних дозволів на підключення. Відзначено екологічну безпеку й енергоефективність таких систем, що дозволяє розглядати їх як перспективний напрям у розвитку сучасних систем теплопостачання. Теплові насосні установки функціонують за рахунок споживання електроенергії, при цьому не лише генеруючи тепло, а й забезпечуючи кондиціювання повітря. Ефективність роботи визначається співвідношенням між спожитою енергією та обсягом отриманого тепла. Згідно з експертними оцінками [15], до 2035 року понад 70% теплової енергії для потреб опалення та гарячого водопостачання в економічно розвинених країнах вироблятимуть теплові насосні установки, що використовують різноманітні низькопотенційні джерела теплоти. Автори [16] відмічають такі основні переваги ТН типу «повітря-вода»:

Економічна доцільність. Теплові насоси характеризуються високим коефіцієнтом перетворення енергії (COP), який, залежно від експлуатаційних умов, може становити від 300 до 700 %. Це означає, що на кожен кіловат спожитої електроенергії система здатна генерувати від 3 до 7 кВт теплової енергії. Така ефективність сприяє зниженню енергоспоживання при забезпеченні теплового комфорту в будівлях та організації гарячого водопостачання. Окрім цього, функціонування теплових насосів не вимагає використання традиційного палива, що усуває потребу в його закупівлі, транспортуванні та зберіганні, а отже, зменшує загальні експлуатаційні витрати.

Підвищений комфорт. Системи теплових насосів не вимагають облаштування спеціальних

приміщень котельні чи отримання погоджень у відповідних інстанціях. Вони характеризуються стабільною роботою, забезпечують мінімальні коливання температури й вологості в приміщенні, а також мають широкі можливості програмного керування.

Екологічна безпека. Експлуатація теплових насосів не супроводжується викидами діоксиду вуглецю, оксидів азоту та інших токсичних сполук, що дозволяє істотно знизити антропогенне навантаження на навколишнє середовище. Це, зокрема, сприяє зменшенню ризику утворення кислотних опадів і має позитивний ефект для збереження озонового шару. Крім того, застосування екологічно безпечних холодоагентів і відсутність горючих речовин унеможливорює виникнення додаткових ризиків, пов'язаних з алергенністю або пожежною небезпекою.

Надійність експлуатації. Обладнання має високий рівень надійності, стійке до перепадів напруги та не потребує частого технічного обслуговування. Орієнтовний термін служби теплового насоса становить не менше 25 років.

Гнучкість застосування. Системи легко інтегруються з будь-якими циркуляційними схемами опалення, а також можуть бути використані для охолодження приміщень у літній період.

Універсальність. Застосування теплових насосів можливе як у приватному житловому, так і у промисловому будівництві, що робить цю технологію універсальним рішенням для широкого спектру об'єктів.

Основними недоліками даних систем є їх вартість та зменшення ефективності при зниженні температури навколишнього середовища при роботі в режимі опалення. Але розвиток технологій та збільшення потужностей виробництва [17] дозволили за останні роки зменшити вартість обладнання та впровадити моделі, які працюють при температурах -30С.

Ґрунтові теплові насоси (GSHP), відомі також як геотермальні, забезпечують стабільнішу роботу завдяки відносно постійній температурі ґрунту. Вони можуть використовувати вертикальні або горизонтальні контури трубопроводів для теплообміну [18]. Однак їх встановлення потребує значних земельних площ, що ускладнює використання в густонаселених містах. У певних кліматичних умовах ґрунтові теплові насоси (ТН) є технічно обґрунтованою та ефективною технологією для забезпечення опалення, охолодження й гарячого водопостачання будівель [19]. Серед ключових переваг таких систем варто відзначити

знижену потребу в електроенергії, мінімальні експлуатаційні витрати та низькі вимоги до технічного обслуговування, що у комплексі забезпечує зменшення загальних річних витрат користувача [20]. Як зазначено у літературі [23], ефективність функціонування ґрунтових теплових насосів значною мірою залежить від метеорологічних умов і теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій. Зокрема, у кліматичних зонах із переважанням режиму охолодження виникає сезонний дисбаланс теплонавантажень, коли влітку теплота інтенсивно передається до ґрунту, тоді як взимку вона виймається в меншій кількості. Це призводить до поступового підвищення температури ґрунту та зниження ефективності теплообмінного процесу з часом [24, 25].

Питання ефективності теплових насосів цього типу ґрунтовно розглянуто у праці [26], де було проаналізовано як переваги, так і наявні обмеження застосування запропонованої теплонасосної системи. Повітряні теплові насоси (ASHP) є найпоширенішим варіантом в Україні, оскільки

потребують менше місця, ніж ґрунтові аналоги [27]. Очікується, що вони відіграватимуть важливу роль у переході на електричне опалення, особливо під час модернізації старих будівель. Проте слід враховувати високі капітальні витрати на оновлення існуючих систем опалення та експлуатаційні витрати, які можуть перевищувати витрати на традиційні газові котли [28]. Надійність, правильне проектування та узгоджена робота кожного з компонентів є критичними для досягнення високої продуктивності та енергоефективності теплового насоса.

На Рис. 1 зображено принципову схему повітряного теплового насоса на основі теплового насосу MyCond BeeHeat [29].

Традиційно в теплових насосах використовувалися гідрохлорфторвуглеводні (HCFC) і гідрофторвуглеводні (HFC), зокрема R-22 та R-410A. Хоча вони мають високі енергетичні характеристики, їхній потенціал глобального потепління (GWP) залишається надзвичайно високим – наприклад, GWP для R-410A становить приблизно

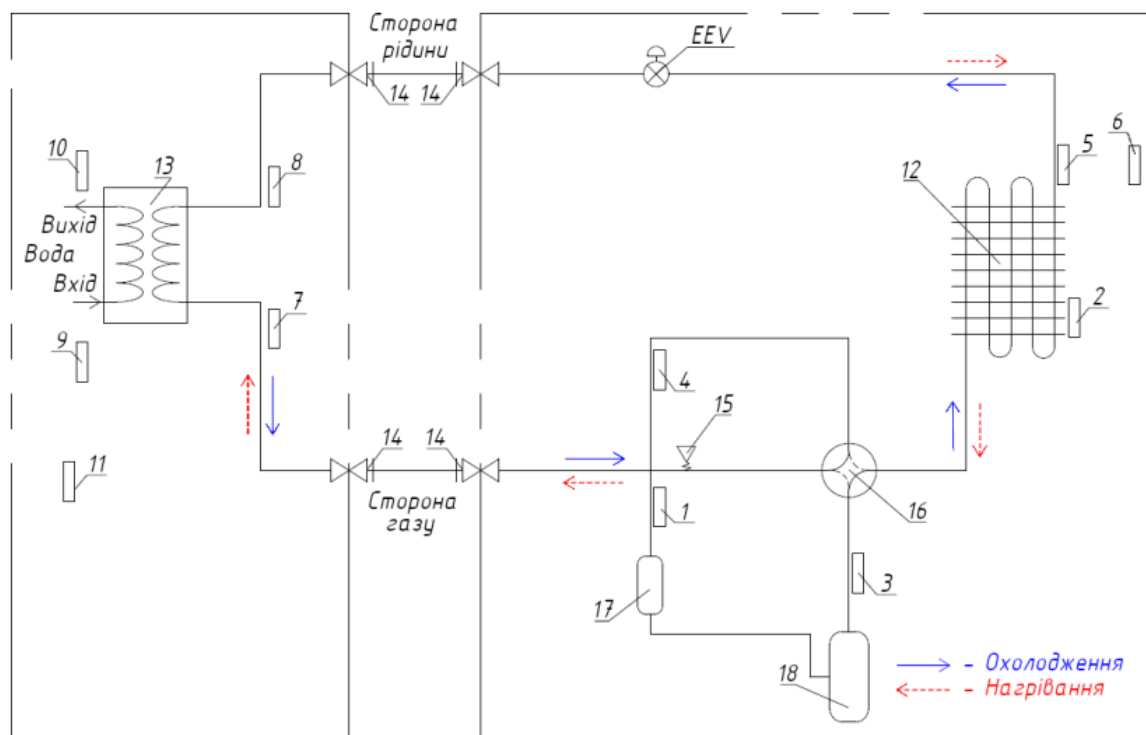


Рис. 1. Принципова схема повітряного теплового насоса

1 – датчик тиску; 2 – середній датчик температури конденсатора; 3 – датчик температури на виході з компресора; 4 – датчик температури труби всмоктування компресора; 5 – датчик температури конденсатора; 6 – датчик температури зовнішнього повітря; EEV – електронний розширювальний клапан; 7 – датчик температури випарника на виході; 8 – датчик температури випарника на вході; 9 – датчик температури води на вході; 10 – датчик температури води на виході; 11 – дистанційний датчик температури повітря; 12 – теплообмінник зовнішнього боку; 13 – пластинчастий теплообмінник внутрішнього боку; 14 – сервісний триходовий клапан; 15 – датчик тиску; 16 – чотириходовий клапан; 17 – накопичувач; 18 – компресор; EEV – електронний розширювальний вентиль

2088 (у CO₂-еквіваленті). У зв'язку з цим сучасна тенденція в ЄС, Японії та США – перехід до низько-GWP речовин, таких як R-32 (GWP ≈ 675), R-290 (пропан, GWP ≈ 3) та CO₂ (R-744, GWP = 1). Наприклад, R-32, що є заміною для R-410A, забезпечує до 10% вищу енергоефективність та знижує екологічне навантаження. Проте через його легку займистість (клас A2L) потрібні спеціальні заходи безпеки при монтажі та експлуатації [30]. Особливої уваги заслуговує CO₂ (R-744), що є природним холодоагентом з нульовим озоноруйнівним потенціалом (ODP = 0) і найнижчим GWP серед усіх доступних варіантів. CO₂ все частіше використовується у високотемпературних теплових насосах, зокрема для ГВП (гарячого водопостачання) та в комерційних застосуваннях [31, 32]. Незважаючи на високий робочий тиск, новітні інженерні рішення дозволяють безпечно інтегрувати такі системи навіть у житлових об'єктах. Згідно з Європейським регламентом F-Gas (Регламент (ЄС) № 517/2014), планується етапне зниження використання HFC на 79% до 2030 року, що стимулює розробку та впровадження альтернативних рішень із низьким або нульовим GWP.

Тепловий насос працює на основі принципу зворотного циклу Карно, який є теоретичною моделлю максимально ефективного теплового двигуна [33]. На рис. 1.2 показано принцип роботи теплового насоса, який полягає у перенесенні теплової енергії з однієї зони в іншу за допомогою фізичних процесів випаровування та конденсації холодоагенту.

Енергоефективність теплових насосів (ТН) визначається шляхом співвідношення кількості виробленої теплової енергії до спожитої електроенергії. Цей показник оцінюється за коефіцієнтом

продуктивності (COP), який відображає відношення потужності нагріву або охолодження (Q) у кіловатах до потужності, що споживається насосом (W), також важливим показником є SPF, який відповідає Директиві ЄС щодо відновлюваної енергії [34], яка визначає відновлювану складову теплоти, що виробляється ТН, і регламентує мінімальне значення $SPF \geq 2,88$ для їхньої класифікації як відновлюваних джерел теплоти [35]. Фактична ефективність ТН може суттєво відрізнятися від заявлених виробником параметрів, оскільки вона залежить від кліматичних умов та характеристик будівлі. Відновлюваними джерелами енергії для ТН вважаються аеротермальні, геотермальні та гідротермальні джерела [36]. Однак перед їх використанням необхідно провести оцінку відповідності нормативним вимогам щодо відновлюваних джерел енергії [36].

Європейський ринок теплових насосів демонструє стабільне зростання: якщо у 2014 році було продано 7,5 мільйона одиниць, то у 2018 році цей показник досяг 11,8 мільйона. Найбільш популярними залишаються повітряні теплові насоси (ASHP) [37]. Політика ЄС сприяє розвитку відновлюваних технологій, заохочуючи їх впровадження і в Україні [38].

Теплові насоси набувають популярності серед споживачів, які прагнуть перейти від традиційних систем опалення на вичерпному паливі до більш екологічних рішень. Вони допомагають зменшити витрати на енергоресурси, скоротити викиди вуглекислого газу та покращити якість повітря. Використання цих технологій [39] у сфері опалення, вентиляції та кондиціювання сприяє зниженню залежності від невідновлюваних джерел енергії та підвищенню енергетичної безпеки.

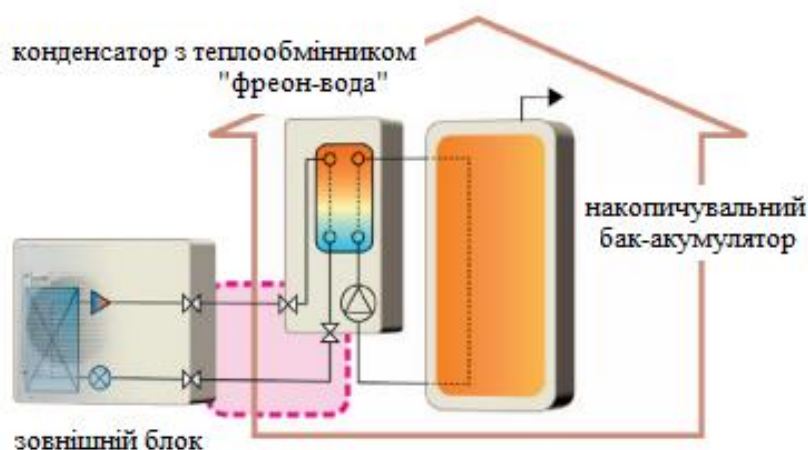


Рис. 2. Принципова схема роботи теплового насоса

Найбільший інтерес у світі викликає застосування теплонасосних технологій саме в комунальному теплогенеруванні. Матеріали конференцій акцентують на стабільному зростанні кількості ТН-установок у системах опалення житлового фонду, який є основним споживачем теплової енергії. Так, у США частка теплонасосів у системах опалення перевищує використання традиційних джерел на основі органічного палива на 22% [40].

Суттєвим переломним моментом у сфері глобальної енергетики стало повномасштабне військове вторгнення Росії в Україну 24 лютого 2022 року. Енергетична й екологічна криза, що виникла внаслідок цих подій у Європі, суттєво змінила ставлення пересічних споживачів до джерел теплової енергії. Європейський енергетичний сектор стрімко переходить на альтернативні джерела, тоді як Росія традиційно використовує свої енергоресурси як інструмент політичного тиску. У матеріалах конференцій Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) [40, 41, 42] та публікаціях журналу Heat Pump Center наведено приклади реалізованих проєктів із терміном окупності, що становить від 9 місяців до 2 років. Тривале і стрімке зростання цін на природний газ протягом останніх років значною мірою зробило систему централізованого теплопостачання в Україні економічно нерентабельною. Очікується, що найбільші зміни впродовж наступних 10 років відбудуться в секторах житлового та цивільного будівництва [43]. За прогнозами, до 2030 року близько 250–300 тисяч багатоквартирних будинків потребуватимуть утеплення [44]. Можна зробити висновки, що ехнологія ТН поступово витісняє котли на ринку опалення.

Постановка завдання. Оскільки все більше власників індивідуальних житлових будинків обирають цю технологію як альтернативу традиційним способам опалення, враховуючи її енергоефективність та екологічність. Окремі пілотні проєкти впроваджуються у закладах соціальної інфраструктури (школи, дитсадки), зокрема за підтримки міжнародних донорів [45]. Однак широкому впровадженню теплових насосів в Україні заважають кілька факторів. По-перше, висока початкова вартість обладнання та монтажу залишається основним стримувальним чинником для більшості споживачів [46]. По-друге, спостерігається нестача кваліфікованих спеціалістів для проєктування, встановлення та обслуговування таких систем. Нарешті, законодавча база лише частково регулює питання підтримки впрова-

дження теплових насосів, і відсутність державних програм стимулювання не сприяє їхньому масовому розповсюдженню [47]. Попри це, потенціал застосування теплових насосів в Україні значний. Найперспективнішими сферами є приватні будинки, об'єкти житлово-комунального господарства (ЖКГ), а також промисловість, де теплові насоси можуть забезпечувати як опалення, так і охолодження з високим коефіцієнтом перетворення енергії [48]. У порівнянні з іншими альтернативами, такими як твердопаливні котли або електроопалення, теплові насоси є більш енергоефективними (коефіцієнт продуктивності COP сягає 3–4) та екологічно безпечними, адже не створюють викидів під час експлуатації. Твердопаливні котли хоч і дешевші у встановленні, однак потребують постійного обслуговування і створюють додаткове екологічне навантаження. Електроопалення, натомість, суттєво підвищує навантаження на електромережу і має високі експлуатаційні витрати [49]. Термін окупності теплового насоса залежить від його типу, вартості встановлення та вартості енергоносіїв, що замінюються. У середньому для повітряного теплового насоса термін окупності становить 2–5 років, а для геотермального – до 10 років через вищу вартість монтажу. Наприклад, при заміні електроопалення тепловим насосом з COP = 3 економія на споживанні електроенергії може сягати 60–70%. У приватному будинку з річним споживанням 15 000 кВт·год це дозволяє заощадити до 40–60 тис. грн на рік. З урахуванням вартості обладнання (150–250 тис. грн), окупність настає в середньому за 3–6 років. Тому виникає необхідність на прикладі реального об'єкту визначити, наскільки ефективнішим буде система опалення на базі теплового насоса повітря-вода, та скільки коштів вона зможе зекономити при експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо прорахунок ефективності теплового насоса типу повітря-вода на базі об'єкту приватний будинок площею 150 м² та порівняємо його з електрокотлом. За розрахункові тепловтрати приймаємо 12 кВт, джерелом опалення буде виступати тепловий насос MyCond BeeHeat MHSN/U16BH [29].

З технічної документації на дане обладнання, та даних по розрахунковій температурі зовнішнього середовища (для Київської області -22°C) на рисунку 1.3 розглянемо графік потреби в опаленні об'єкта та фактичну потужність теплового насоса. Також на графіку показано точку бівалентності, при якій фактичної потужності ТН не вистачає для покриття тепловтрат приміщення. Також на

Таблиця 1

Технічні характеристики	Од.	MHSN/U16BH
Теплова потужність (A7/W35)	кВт	16,2
COP (A7/W35)		4,4
Теплова потужність мін/макс (A7/W35)	кВт	6,6-16,5
Максимальна теплова потужність (A-7/W35)	кВт	13,5
COP (A-7/W35)		2,6
Потужність охолодження (A35/W7)	кВт	14
EER		2,5
Діапазон зовнішньої температури в режимі нагріву (ГВП)	°C	-25...+30 (+43)
Діапазон зовнішньої температури в режимі охолодження	°C	+18...+43
Максимальна температура подачі	°C	60
Холодоагент (тип)		R32
Живлення	В / Гц	400 / 50
Рівень звукової потужності (внутр. / зовн. блок)	дБ(А)	42 / 68
Клас енергоефективності		
- Низькотемпературна експлуатація (W35)	A+++	
- Середньотемпературна експлуатація (W55)	A++	

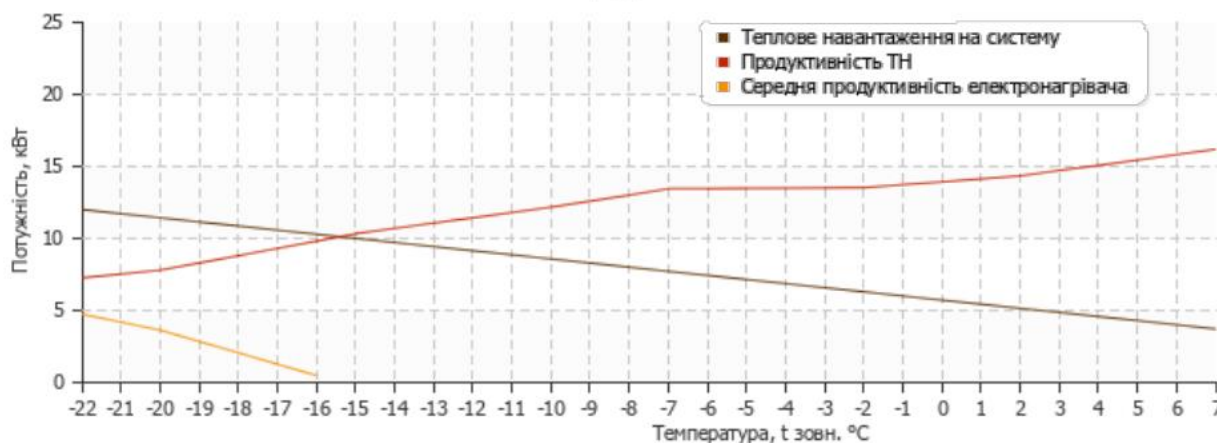


Рис. 3. Графік залежності тепловтрат будинку від температури зовнішнього середовища та фактична потужність ТН

графіку показано потужність пікового джерела, яким в даному випадку виступає трубчастий електронагрівач (ТЕН).

Необхідна продуктивність ТН (кВт): необхідна теплова потужність теплового насоса для повного покриття тепловтрат при заданій розрахунковій температурі.

Розрахункова температура (°C): мінімальна розрахункова температура ($t_{\text{зовн.}}$ °C) зовнішнього повітря. Приймається за статистичними кліматичними даними в місці установки ТН.

Температура без навантаження (°C): ТН не працюватиме на опалення, якщо температура зовнішнього повітря вище даного значення.

Додаткова теплова потужність (кВт): теплопродуктивність додаткового джерела тепла, яка

відраховується від розрахункової точки бівалентності ($T_{\text{розр.}}$)

Точка бівалентності (°C): розрахункова мінімальна температура зовнішнього повітря, при якій ТН повністю (на 100%) покриває тепловтрати будівлі.

Оскільки в опалювальний період температура зовнішнього середовища не є постійною, це треба враховувати при оцінці ефективності роботи обладнання. При зниженні температури навколишнього середовища, знижується ефективність ТН. Для моделі теплового насосу MyCond BeeHeat MHSN/U16BH COP при температурі навколишнього середовища +8°C складає 4,61, а при -22°C – 1,66 відповідно. Тому для правильного розрахунку, необхідно враховувати ці фак-

тори. Також слід враховувати, що при низьких температурах зовнішнього середовища збільшуються тепловтрати самого приміщення і при температурах нижче -16°C (точка бівалентності) теплової потужності теплового насосу буде не вистачати для покриття цих тепловтрат. Саме для цього використовується додаткове джерело живлення (пікове джерело), яким в нашому випадку виступає трубчастий електронагрівач (ТЕН). Цей нагрівальний пристрій, який вмонтований в корпус гідромодулю догріває теплоносії, коли не вистачає потужності ТН. Тому затрати на електроенергію будуть сумою безпосередньо ТН та пікового джерела (ТЕН).

Використавши дані, про температуру зовнішнього середовища [50] в м.Київ та Київській області, використавши дані про COP обладнання при цих температурах [56] отримаємо дані по спожитих енергоресурсах ТН та продуктивності підібраного обладнання, які занесемо в Таблицю 3.

Для розрахунку вартості експлуатації обладнання використовуємо отримані дані по тепловому навантаженню будинку за весь період, та враховуючи вартість електроенергії для побутових споживачів на рівні 4,32 грн./кВт. ККД електричного котла для спрощення розрахунків приймаємо за 100%. Дані отримані при опаленні електродомом заносимо в Таблицю 4.

Аналогічно прораховуємо вартість для ТН, де частина енергоресурсів буде спожита безпосередньо тепловим насосом, а частина вбудованим електронагрівачем та занесемо отримані дані в Таблицю 5.

Таким чином ми визначили середні експлуатаційні витрати на електроенергію за опалювальний період при використанні електричного котла та теплового насосу повітря-вода з вбудованим ТЕНом. Для наглядності побудуємо порівняльний графік на Рисунку 4.

Таким чином порівнявши затрати на електроенергію за один опалювальний сезон в будинку площею 150 м^2 розташованого в м. Київ економія в вартості експлуатації системи опалення між тепловим насосом Muscond BeeHeat та електродомом за опалювальний сезон складає **79 377 грн.**

Висновки. Теплові насоси демонструють високу довгострокову ефективність завдяки стабільно високому коефіцієнту перетворення енергії (COP), який у більшості сучасних моделей становить 3–5. Це означає, що на кожен 1 кВт спожитої електроенергії виробляється 3–5 кВт теплової енергії. За умови правильного проєктування і регулярного технічного обслуговування тепловий насос може ефективно працювати 15–20 років. Протягом цього періоду споживачі отримують значну економію на витратах на опалення, особливо у порівнянні з електроопаленням або традиційними системами на викопному паливі. Крім того, стабільність цін на електроенергію у порівнянні з газом або твердим паливом робить експлуатаційні витрати прогнозованими, що важливо для довгострокового енергетичного планування [49]. Попри очевидні переваги теплових насосів як енергоефективного та екологічного джерела теплопостачання, їх широке впровадження в Україні стикається з рядом серйозних проблем. Насамперед, це високі початкові інвестиції. Встановлення сучасної системи теплового насоса разом із проєктуванням, бурінням (у разі геотермальних систем) або зовнішнім монтажем (для повітряних) може сягати 150–300 тис. грн для приватного будинку. Такий рівень витрат є стримувальним чинником для середньостатистичного українського споживача [46]. Крім того, існує розрив між вимогами ДБН (державних будівельних норм) та сучасною практикою монтажу, що створює правову невизначеність для проєктувальників і забудовників [51]. Третім важливим викликом є сезонна ефективність теплових насосів,

Таблиця 2

Розрахункові характеристики ТН

Пункт	Позначення	Значення
Необхідна теплопродуктивність для даного об'єкта, кВт	$P_{\text{розр.}}$	12
Розрахункова температура, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{розр.}}$	-22
Температура без навантаження, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{б/н}}$	12
Річне навантаження, кВт·год	кВт	27119,32
Точка бівалентності, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{бів.}}$	-15,42
Потреба в додатковому електронагрівнику, кВт·год	кВт	166,39
Разом	Позначення	Значення
Сумарна теплопродуктивність ТН, кВт·год	CAP	26952,93
Сумарна споживана потужність ТН, кВт·год	$P_{\text{спож.}}$	8160,64

Таблиця 3

Розрахунок експлуатаційних витрат на систему опалення теплового насосу типу спліт Mycond BeeHeat

Інтервал температури повітря, °С	Години стояння температур	Необхідне навант. за годину, кВт	Фактична продуктивність підбраного обладнання, кВт	Покриття навант. піковим джерелом, кВт	Загальне навант. за опал. період, кВт
-22/-20,1	9	12	7,33	4,68	108
-20/-18,1	26	11,14	8,02	3,12	290
-18/-16,1	44	10,57	9,32	1,26	465
-16/-14,1	70	10	10,61		700
-14/-12,1	105	9,43	11,57		990
-12/-10,1	131	8,86	12,52		1160
-10/-8,1	166	8,29	13,17		1375
-8/-6,1	237	7,71	13,82		1828
-6/-4,1	301	7,14	13,86		2150
-4/-2,1	403	6,57	13,89		2648
-2/-0,1	526	5,71	14,32		3006
0/1,9	833	5,43	14,53		4522
2/3,9	561	4,86	14,74		2725
4/5,9	456	4,29	15,69		1954
6/7,9	456	3,71	16,64		1694
8/9,9	491	3,14	16,82		1543
	4815		26980	179	27159
Середній COP за опалювальний період			3,14		
Кількість спожитих енергоресурсів підбраним обладнанням, кВт			8606		

Таблиця 4

Розрахунок економічних показників де джерелом тепла є електроджерело

Джерело теплоти	Електроджерело
Кількість спожитих енергоресурсів, кВт	27159
Тариф, грн./кВт	4,32
Вартість експлуатації, грн./сезон	117 326 грн.

Таблиця 5

Розрахунок економічних показників тепловий насос та вбудований електронагрівач

Джерело теплоти	Тепловий насос типу спліт Mycond BeeHeat	ЕлектроТЕН	Сума
Кількість спожитих енергоресурсів, кВт	8606	179	
Тариф, грн./кВт	4,32	4,32	
Вартість експлуатації, грн./сезон	37 178 грн.	771 грн.	37 949 грн.

особливо повітряного типу, в умовах українського клімату. При сильних морозах (нижче -15°C) коефіцієнт перетворення енергії (COP) істотно знижується, і система може потребувати додаткового електронагріву, що зменшує загальну енергоефективність та підвищує витрати [49]. Це знижує привабливість теплових насосів у північних і східних регіонах країни, де холодні зими є нормою. Таким чином, для розвитку ринку теплових насосів в Україні необхідна комплексна державна

політика: впровадження фінансових стимулів, оновлення будівельних норм і підтримка навчання фахівців. Лише тоді ця технологія зможе стати реальною альтернативою традиційним джерелам тепла на великій території країни.

У найближчі десятиліття теплові насоси стануть ключовим елементом у декарбонізації систем опалення, особливо завдяки інтеграції з іншими передовими технологіями. Одним із перспективних напрямів є поєднання теплових

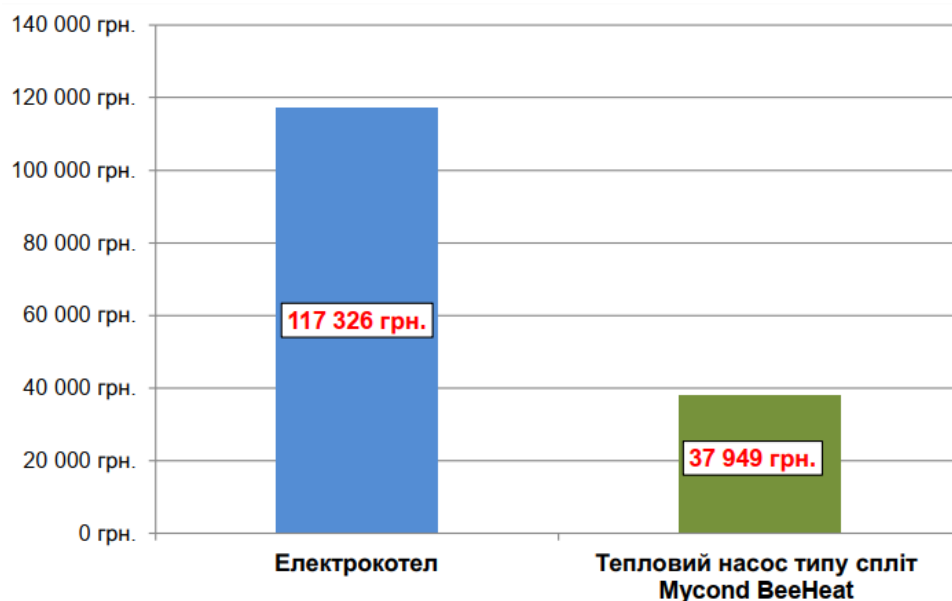


Рис. 4. Графік порівняння експлуатаційних витрат на систему опалення за опалювальний сезон

насосів із фотоелектричними системами (PV + НР), що дозволяє забезпечити автономність та майже повну незалежність від зовнішніх джерел енергії. Надлишкова електроенергія, вироблена сонячними панелями, може спрямовуватись на живлення теплового насоса, особливо в міжсезоння [52].

Інший важливий тренд – інтеграція теплових насосів у Smart Grid-мережі з використанням теплових акумуляторів. Завдяки розподілу навантажень у часі та зберігання тепла в спеціальних резервуарах, такі системи здатні підвищити стабільність енергопостачання та ефективно використовувати енергію в періоди низького тарифу [53].

Важливу роль у розвитку галузі відіграють інновації в холодоагентах. Нові типи безфреонових або природних холодоагентів, таких як R-290 (пропан) або CO₂ (R-744), є менш шкідливими для клімату та відповідають сучасним екологічним вимогам ЄС і Киотського протоколу. Їх впровадження дозволяє знизити вплив на довкілля без втрати ефективності [54].

Крім того, зростає роль цифрових технологій, таких як AI (штучний інтелект) та IoT (інтернет речей), у керуванні тепловими насосами. Завдяки

інтелектуальним алгоритмам система може адаптувати свою роботу до погодних умов, режиму споживання енергії та тарифів, що дозволяє підвищити коефіцієнт перетворення енергії (COP) на 10–20% [55].

В ході проведеного порівняння затрат на опалення будинку тепловим насосом та електрокотлом, визначено економію коштів, на прикладі реального об'єкту – будинку в м. Київ площею 150 м². На основі отриманих даних, можна зробити висновки, що теплові насоси є одним із найбільш ефективних рішень для забезпечення опалення, охолодження та гарячого водопостачання в умовах сучасної енергетичної трансформації. З технічного погляду, вони забезпечують високий коефіцієнт корисної дії (COP), який у сучасних моделях сягає 3–5. З економічної точки зору, хоча початкові інвестиції залишаються досить високими, термін окупності за умови правильного монтажу та експлуатації становить 3–6 років, особливо при заміні електроопалення або газових систем. В екологічному аспекті теплові насоси не створюють локальних викидів парникових газів і сприяють зменшенню залежності від викопного палива, що є важливою складовою декарбонізації.

Список літератури:

1. Council Climate. Key Issues for the New Climate Agreement 2015. ClimateJournal. 2015. Vol. 9. P. 9.
2. UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Paris, 2015.
3. Bowen A., Rydge J. Climate change policy in the United Kingdom. London: Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment, 2011.

4. Review of the Market of Thermal Pumps. Electronic Magazine of Power Service Company «Cities and Buildings». 2013. No. 7. July.
5. Reay D. Industrial Heat Pumps. 2nd ed. Oxford: Pergamon, 2001.
6. International Energy Agency (IEA). The Future of Heat Pumps. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>
7. Connolly D., Mathiesen B.V., et al. Decarbonising Heat with Heat Pumps in Europe: Challenges and Innovations. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2023. Vol. 173. 113010. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113010
8. U.S. Department of Energy (DOE). Cold Climate Heat Pump Technology Challenges and Research Needs. 2021. URL: <https://www.energy.gov>
9. Kobayashi K., Yamaguchi S., Tanaka H. Smart Heat Pump Systems Using AI-Based Optimization in Japan. Energy and Buildings. 2022. Vol. 267. 112132.
10. Zhao X., Wu J., Zhang L. Heat Pump Flexibility for Demand-Side Management: A Systematic Review. Applied Energy. 2023. Vol. 342. 120993.
11. Staffell I., Brett D., Brandon N., et al. A review of domestic heat pumps. Energy Environ Sci. 2012. Vol. 5, No. 11. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/c2ee22653g>
12. Безродний М.К., Притула Н.О., Місюра Т.О. Аналіз ефективності теплонасосної схеми опалення з використанням теплоти атмосферного повітря і сонячної енергії. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. No. 4 (50). С. 47–57.
13. Kelly N., Cockroft J. Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data. Energy Build. 2011. Vol. 43, No. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018>
14. Zhang Y., Zhang G., Zhang A., et al. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: An analysis and review. Energies. 2018. Vol. 11, No. 10. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en1102642>
15. Лавріщев О.О., Новосилецький Ю.Л., Дідківський М.М. Доцільність застосування теплових насосів «повітря – вода» в умовах помірного клімату. Global science: prospects and innovations (Liverpool, 25–27 April, 2024): proceedings of IX International scientific and practical conference. Liverpool: Cognum Publishing House, 2024. P. 128–133.
16. Євтушенко Е., Ляхно М. Використання теплових насосів для отримання тепла і холоду. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2014/23.pdf
17. Jiang Jiatong, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. 112106.
18. Deng J., Wei Q., Liang M., et al. Test on energy performance of medium-depth geothermal heat pump systems (MD-GHPs). Energy Build. 2019. Vol. 184. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.006>
19. Omer A.M. Ground-source heat pump systems and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 10. P. 123–134.
20. Lund J.W. Ground source (geothermal) heat pumps. In: Lineau P.J., editor. Course on heating with geothermal energy: conventional and new schemes. World geothermal congress 2020 short courses. Kazuno, Tohoku District, Japan, 2020. P. 1–21.
21. Sanner B., Karytsas C., Mendrinis D., Rybach L. Current status of ground source heat pumps and underground thermal storage in Europe. Geothermics. 2013. Vol. 32. P. 579–588.
22. Hepbasli A., Akdemir O., Hancioglu E. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 44. P. 527–548.
23. Liu Z., Xu W., Qian C., Chen X., Jin G. Investigation on the feasibility and performance of ground source heat pump (GSHP) in three cities in cold climate zone, China. Renewable Energy. 2015. Vol. 19. P. 76–89.
24. Yang W., Chen Y., Shi M., Spitler J.D. Numerical investigation on the underground thermal imbalance of ground-coupled heat pump operated in cooling dominated district. Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 58. P. 627–637.
25. Pandey N., Murugesan K., Thomas H.R. Optimization of ground heat exchangers for space heating and cooling applications using Taguchi method and utility concept. Applied Energy. 2017. Vol. 190. P. 421–438.
26. Безродний М.К., Ословський С.О. Термодинамічна ефективність роботи теплонасосної системи кондиціонування на базі вертикального ґрунтового теплообмінника. Енергетика і автоматика. 2023. № 3. DOI: [http://dx.doi.org/10.31548/energiya3\(67\).2023.074](http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(67).2023.074)
27. EHPA. European heat pump market and statistics. 2021. URL: http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/
28. Le K.X., Huang M.J., Shah N.N., et al. Techno-economic assessment of cascade air-to-water heat pump retrofitted into residential buildings using experimentally validated simulations. Applied Energy. 2019. Vol. 250. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.041>

29. Офіційний сайт виробника. URL: <https://mycond.ua/teplovi-nasosy-seriyi-beehheat>
30. Peksel A., Arıcı M., Karabay H. A review on alternative refrigerants in heat pump systems: Environmental and thermodynamic comparison. *International Journal of Refrigeration*. 2021. Vol. 125. P. 33–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.025>
31. Lorentzen G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *International Journal of Refrigeration*. 1994. Vol. 17, No. 5. P. 292–301.
32. Aprea C., Greco A., Maiorino A. An overview on the use of CO₂ as refrigerant in heat pump systems. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 5781–5795.
33. Dossat R., Horan T. *Principles of Refrigeration*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 560 p.
34. COM. Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*. 2009.
35. Gleeson C.P., Lowe R. Meta-analysis of European heat pump field trial efficiencies. *Energy Build.* 2013. Vol. 66. P. 637–647. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.064>
36. Madonna F., Bazzocchi F. Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings. *Energy Build.* 2013. Vol. 65. P. 299–309. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.016>
37. Alberini A., Gans W., Towe C. Free riding, upsizing, and energy efficiency incentives in Maryland homes. *Energy J.* 2016. Vol. 37, No. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.5547/01956574.37.1.aalb>
38. Caird S., Roy R., Potter S. Domestic heat pumps in Ukraine: user behaviour, satisfaction and performance. *Energy Effic.* 2012. Vol. 5, No. 3.
39. Guo S., Yan D., Hu S. Global comparison of building energy use data within the context of climate change. *Energy Build.* 2020. Vol. 226. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110362>
40. Reports at the 9th IEA Heat Pump Conference. Zurich, 2008. P. 54–111.
41. Reports at the 8th IEA Heat Pump Conference. Las Vegas, 2005. P. 67–95.
42. Reports at the 10th IEA Heat Pump Conference. Tokyo, 2011. P. 44–78.
43. Степаненко В.А. Яким буде теплопостачання України у XXI столітті. С. 114–120.
44. Мацевитий Ю.М., Чіркін М.Б., Остапчук В.М. Альтернативна система теплопостачання на основі теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником. *Енергозбереження, енергетика, енергоаудит*. 2007. № 8. С. 111–154.
45. Держенергоефективності. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні – 2023. URL: <https://saee.gov.ua/>
46. Теплові насоси: огляд ринку України. *Energy Evolution*, 2022.
47. Білявський Г.О., Яковенко Р.С. *Енергозбереження та альтернативна енергетика*. Київ: Ліра-К, 2020. 256 с.
48. Пашенко О.В. *Інноваційні технології в опаленні будівель*. Львів: Видавництво ЛНУ, 2021. 150 с.
49. European Heat Pump Association. *Heat Pump Outlook in Central and Eastern Europe*. 2022. URL: <https://www.ehpa.org>
50. Суходуб І.О., Шкляр В.І., Дубровська В.В. Аналіз фактичних, типових та нормативних кліматичних даних в контексті енергетичного моделювання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 2. С. 35–43. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2022.261367.
51. Держенергоефективності. Рекомендації щодо впровадження теплових насосів в системах теплопостачання. URL: <https://saee.gov.ua>
52. International Energy Agency (IEA). *The Future of Heat Pumps*. Paris: IEA, 2022. URL: <https://www.iea.org>
53. European Heat Pump Association. *Smart Heat Pumping Solutions for a Low-Carbon Future*. 2023. URL: <https://www.ehpa.org>
54. Dincer I., Rosen M.A. *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Wiley, 2021. 576 p.
55. Zhang L., et al. *Artificial Intelligence in Heat Pump Systems: A Review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022.

Tkachenko M.V., Ryndiuk D.V. FEATURES OF HEATING AND AIR CONDITIONING SYSTEMS BASED ON HEAT PUMPS

The article addresses the issue of reducing energy consumption and greenhouse gas emissions in the residential sector, which requires the implementation of highly efficient and environmentally safe heating technologies.

Given the significant rise in the cost of traditional energy sources and the relevance of decarbonizing heating systems, the use of heat pumps is seen as a promising direction for modernizing the energy infrastructure. This issue is particularly important in the context of climate adaptation and improving the energy efficiency of the building stock.

The advantages of heat pumps are highlighted, including a high coefficient of performance (COP), zero harmful emissions, application flexibility, and long service life. At the same time, certain limitations are identified: high initial cost, reduced efficiency at low temperatures, the need for qualified maintenance, and the lack of government support in Ukraine.

Special attention is paid to environmental aspects, particularly the transition to safer refrigerants with low global warming potential.

The aim of the study is to assess the techno-economic efficiency of using an air-source heat pump for heating a private house in Ukraine's temperate climate and to compare its operational characteristics with those of an electric boiler.

The study employs methods of thermal engineering calculation, energy consumption analysis, seasonal outdoor temperature dynamics, and techno-economic comparison of heating systems based on energy use, efficiency ratio, and operating costs.

The technical specifications of the Mycond BeeHeat air-to-water heat pump with a nominal thermal capacity of 16.2 kW are analyzed, along with the results of its practical application in a 150 m² house. Based on the hourly distribution of outdoor temperatures in the Kyiv region, the required heat load during the heating season is determined.

It is established that the average seasonal coefficient of performance of the heat pump is 3.14, and the total energy consumption of the system, including peak load, amounts to 8,785 kWh.

In comparison with an electric boiler consuming 27,159 kWh over the same period, the cost savings exceed 79,000 UAH per season. A graph of heat loss coverage depending on temperature is constructed, and the system's bivalence point is identified. The stable operation of the equipment is confirmed under temperatures down to -22 °C.

The practical value of this work lies in demonstrating the real potential of implementing heat pumps in Ukraine's private sector as an alternative to electric heating. The results can be used for preliminary techno-economic justification of equipment selection, investment planning in thermal modernization, and optimization of building energy consumption.

Key words: *heat pump, heating system, energy efficiency, air heat source, coefficient of performance, energy consumption, techno-economic assessment, alternative heating, thermal modernization.*

Дата надходження статті: 22.07.2025

Дата прийняття статті: 28.08.2025

Опубліковано: 27.10.2025