

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.577 : 697.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/26>

Безродний М.К.

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

Тесленко О.І.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Притула Н.О.

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

Дерій В.О.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Сліжевський К.Д.

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

ТЕХНІЧНІ БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Проаналізовано існуючий стан та перспективи впровадження теплових насосів у системах централізованого теплопостачання. Наведено світовий досвід використання відновлювальної енергії та прогнози трансформації паливно-енергетичного комплексу як у світі, так і в Україні. Використання відновлювальних джерел енергії світова спільнота розглядає як один із найбільш перспективних шляхів вирішення зростаючих проблем енергозабезпечення. Відмічено важливість переходу до будівництва житла із системами відновлюваної енергії та технологіями з низьким вмістом вуглецю для забезпечення теплопостачання. Наведено економічно доступний енергетичний потенціал виробництва теплової енергії тепловими насосами в системах централізованого теплопостачання України від різних джерел низькопотенційної теплоти природного та антропогенного походження. Наведено класифікацію технічних бар'єрів. Технічні бар'єри для впровадження теплонасосних систем було поділено на чотири основні групи, які обумовлені технічними та технологічними особливостями складових даних систем, а саме: безпосередньо теплові насоси, джерела низькопотенційної теплоти, теплові та електричні мережі, а також умови споживання теплової енергії. Показано шляхи їх подолання для забезпечення широкого використання теплових насосів в Україні. Виконано порівняння теплонасосних схем опалення в оптимальних умовах їх роботи з традиційними системами (з водогрійними та конденсаційними котлами). Визначено, що впровадження теплонасосних систем теплопостачання за оптимальних умов їх використання є конкурентоспроможними порівняно не тільки з традиційними котельнями, а й з конденсаційними котлами. При використанні теплонасосними установками джерел низькопотенційної теплоти природного походження слід також враховувати перешкоди, які обумовлені розбіжністю добових та сезонних графіків теплових навантажень (споживання) теплової енергії і можливостей теплового насоса.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, тепловий насос, впровадження, бар'єри, джерела низькопотенційної теплоти.

Постановка проблеми. Енергія є джерелом життя сучасного суспільства. За останні десятиліття світове споживання енергії та пов'язані з ним викиди парникових газів (ПГ) швидко зросли через збільшення населення та потреби людей у комфорті. Опалення, вентиляція та кондиціонування складають значну частину кінцевого споживання енергії у світі, особливо в житловому секторі. Наприклад, на цей сектор припадає 39% та 40% споживання енергії та 38% та 36% викидів ПГ у США та Європі, відповідно [1]. Виникає актуальна задача знаходження нових джерел енергії та низьковуглецевих технологій їхнього використання. Основною метою вирішення цієї задачі є зменшення залежності від традиційних викопних паливних джерел енергії, поліпшення екологічної ситуації, стабільне постачання енергії та сприяння сталому розвитку країни [2].

Міжнародною агенцією з відновлювальної енергії (англ. The International Renewable Energy Agency – IRENA) прогнозується суттєва трансформація паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) світу на періоди до 2030 р. та до 2050 р. у напрямі сталого розвитку людської цивілізації з всеохоплюючим залученням відновлювальних джерел енергії [3, 4]. В секторі теплопостачання вже відбувається революційне впровадження технологій четвертого та п'ятого поколінь, насамперед інноваційних теплонасосних (ТН) технологій з ефективним використанням низькопотенційної теплоти довкілля [5–8]. В країнах Європейського Союзу розроблена дорожня карта низьковуглецевого розвитку систем централізованого теплопостачання (СЦТ) до 2050 р. (HRE 2050), очікуваний результат якої показано на рис. 1 [9, 10]. Планується збільшення частки виробництва теплової енергії із використанням ТН до 24% від загального обсягу СЦТ Європи.

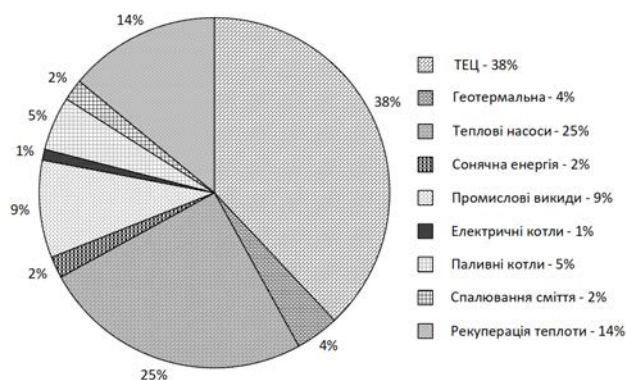


Рис. 1. Частки джерел централізованого теплопостачання в HRE 2050

Традиційні СЦТ, які притаманні для України, мають низьку енергетичну і екологічну ефективність, великі втрати теплоти в системах теплових мереж (досягають 20% і більше, коли норма становить 8%) [11]. Також важливо враховувати низький ексергетичний коефіцієнт корисної дії використання хімічної енергії палива, який для систем опалення становить 6–10% [12]. Серйозні проблеми можуть виникати під час реконструкції існуючих об'єктів теплопостачання та будівництва нових у міських районах із щільною забудовою. У цих випадках під'єднання нових споживачів до районної теплової мережі та діючих ТЕЦ обмеженої теплової потужності призводить до зниження температури теплоносія, що подається до існуючих об'єктів.

За структурою споживання первинної енергії перше місце займає природний газ, ціни на який постійно зростають [13]. Таким чином, ми спостерігаємо постійну тенденцію: потреба в енергії зростає, ціни на енергоносії збільшуються, а запаси органічного палива вичерпуються, отже одним із перспективних напрямків є технології використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як теплонасосні системи (ТНС) та створення комплексних (гібридних) систем теплопостачання і холодопостачання.

З точки зору енергоефективності, нині Україна відстає від інших європейських країн у зв'язку з застарілими технологіями, що використовуються в багатьох галузях економіки та, відповідно, неекономним використанням енергії. Перехід до будівництва житла із системами відновлюваної енергії та технологіями з низькими викидами ПГ для забезпечення теплопостачання є важливим стратегічним завданням для України [11].

В роботах провідних наукових організацій України визначено суттєвий техніко-економічний та енергетичний потенціал використання ТН технологій в секторі теплопостачання ПЕК України [12, 14–20]. Зокрема, в роботах фахівців Інституту загальної енергетики [21] визначено економічно доступний енергетичний потенціал виробництва теплової енергії ТН в СЦТ від різних джерел низькопотенційної теплоти (ДНТ) як за регіонами України, так і для країни в цілому. Станом на 2020 р. цей енергетичний потенціал для СЦТ України дорівнює 62,601 млн Гкал/рік (262,1 ПДж/рік): 22,2% забезпечується природними ДНТ (теплота повітря (2,2%), води річок (16,9%) та ґрунту і ґрунтових вод (3,1%)) та 77,8% забезпечується антропогенними ДНТ (теплота вентиляційних викидів будівель (43,0%), які

приєднані до СЦТ, стічних каналізаційних вод (9,7%), димових газів котельень та ТЕЦ (14,3%), води охолодження технологічних процесів (10,8%).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Нині у світі спостерігаються зміни у підходах до формування енергетичної політики держав. Здійснюється перехід від моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінувало використання традиційних викопних палив, неефективного транспортування теплоносія тепловими мережами, нерівна конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля – до нової моделі. Ця модель створює більш сприятливе конкурентне середовище, надаються рівні можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим, віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії із відновлюваних та альтернативних джерел [11]. Окрім цього, глобальний розвиток енергетики націлений на впровадження заходів з протидії зміні клімату. Це стає одним із пріоритетів, щоб зменшити негативні наслідки глобального потепління та інших екологічних проблем. У цілому, ці тенденції в енергетичній політиці держав сприяють створенню більш стійкого, ефективного та екологічно чистого енергетичного сектору, що сприятиме забезпеченню сталого розвитку світової економіки та добробуту населення [2].

ТН технологія є найбільш перспективною серед нетрадиційної енергетики для вирішення проблем енергозбереження, однак питання вибору типу ТН, масштабів й сфер їх раціонального використання в різних країнах є далеко не однозначними, оскільки їхнє виробництво в кожній країні орієнтоване насамперед на задоволення потреб внутрішнього ринку, на кліматичні та географічні особливості країни, рівень розвитку економіки, паливно-енергетичний баланс, співвідношення цін на основні види палива та електроенергію, рівень будівельних технологій та архітектурно-планувальних конструкцій, особливості систем теплопостачання об'єктів житлово-комунального господарства, використовувани технології та рівень виконання монтажних і сервісних робіт [12].

В Європі спостерігається широке застосування ТН для обігріву (разом з постачанням гарячої води) та охолодження. За звітом Європейської асоціації теплових насосів (англ. The European Heat Pump Association – ЕНРА) [22] у сукупному вираженні за період 1996–2022 рр. в країнах Європи було встановлено 19,79 млн ТН загальною

тепловою потужністю 173,6 ГВт. Ці ТН виробили 325,0 ТВт·год корисної енергії (для обігріву та охолодження), з яких залучено 205,2 ТВт·год від ВДЕ. Використання такого обсягу ТН заощадило за цей період 262,6 ТВт·год енергоресурсів у кінцевому їх споживанні та 117,6 ТВт·год первинних енергоресурсів. Ці майже 20 млн ТН забезпечують опалення приблизно 16% житлових і комерційних будівель у Європі. Загальна встановлена потужність ТН у Європі дозволила уникнути 52,5 Мт $\text{CO}_{2\text{-екв}}$ викидів ПГ, що приблизно дорівнює річним викидам Греції. У 2022 році в країнах Європи встановлено ТН загальною тепловою потужністю 28,18 ГВт, які виробляють прибіл. 45,45 ТВт·год корисної енергії для обігріву та охолодження із залученням 28,39 ТВт·год від ВДЕ, уникаючи при цьому 7,24 Мт $\text{CO}_{2\text{-екв}}$ викидів ПГ.

У Швеції та інших скандинавських країнах наявність дешевої електроенергії та розповсюдження СЦТ призвели до створення ТНС великої потужності. Серед діючих великих ТНС СЦТ необхідно відзначити станції, що споруджені в містах Бурленге (24 МВт), Умеа (34 МВт), Ужала (39 МВт), Еребру (40 МВт) та Стокгольмі (320 МВт). Для цих станцій як джерела низькопотенційної теплоти (НПТ) використовуються міські стічні води, промислові водяні стоки та вода Балтійського моря.

Світовий ринок теплових насосів можна сегментувати за такими напрямками діяльності [12, 14–21]:

- повітряні реверсивні ТН кімнатного типу та пакетні системи середньої та великої потужності (Японія, Китай, Південна Корея, Італія);

- повітряні реверсивні ТН для використання у системах центрального кондиціонування повітря (США);

- реверсивні ТН типу «вода – повітря» та «грунт – повітря» невеликої потужності та системи на їх основі (США);

- ТН тільки нагріву для водяних систем опалення типів «вода – вода», «грунт – вода», «повітря – вода» (Європа);

- надпотужні ТН та теплонасосні станції районного централізованого опалення (Європа);

- районні станції комбінованого тепло- та холодопостачання на базі абсорбційних та газомоторних ТН (Японія).

Щодо використання ТН у світовій практиці, можна зробити такі беззаперечні висновки: використання ТН забезпечує економію первинних енергетичних ресурсів і у всіх випадках вигідно державі; найбільший ефект використання ТН

є в умовах жаркого клімату, коли установка працює на виробництво теплоти і холоду, або за умови тривалого опалювального сезону, коли забезпечується значна економія палива; заміна безпосереднього електричного опалення на ТН економічно та енергетично доцільно за будь-яких умов; основним напрямом використання ТН є комбінування з пиковими підігрівачами інших типів.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є визначення та аналіз технічних бар'єрів, перешкод та обмежень для впровадження ТН технології в СЦТ України та відповідно формування запобіжних заходів та рекомендацій по їх усуненню. Надати розгорнуту класифікацію технічних бар'єрів та висвітлити стратегічні напрями їх подолань.

Виклад основного матеріалу. Технічні перешкоди для впровадження ТНС можна поділити на наступні основні групи, які обумовлені технічними та технологічними особливостями складових даних систем, а саме: безпосередньо теплові насоси, джерела НПП, теплові та електричні мережі, а також особливості споживання теплової енергії. Розглянемо всі їх послідовно.

Теплові насоси. Енергетична ефективність парокомпресійного ТН визначається коефіцієнтом трансформації теплоти ТН (coefficient of performance COP), який являє собою відношення теплової продуктивності до електричної потужності, що споживається установкою та обчислюється за виразом [12]

$$\phi = COP = Q_k / L_k, \quad (1)$$

де Q_k – тепловий потік, відведений від конденсатора ТН, кВт; L_k – затрати енергії на роботу компресора ТН, кВт.

Співвідношення (1) демонструє той факт, що енергія Q_k , яка віддається споживачу на задоволення потреб в опаленні, вентиляції та гарячому водопостачанні, більша за енергію, яка витрачена на цикл L_k . Рівень COP ТН в значній мірі визначається раціональним поєднанням параметрів джерела теплоти низького потенціалу достатньої енергоємності і необхідних параметрів теплоти споживача.

З іншого боку, величина реального COP ТН може бути оцінена як

$$\phi = COP = \eta_{ТН} \phi_T, \quad (2)$$

де $\eta_{ТН}$ – коефіцієнт втрат або ККД ТН, який враховує відхилення реального циклу від ідеального циклу Карно, а також всі втрати в ТН. Для ТНУ, які відбирають теплоту з повітря, присутні великі необоротності, тому слід приймати

$\eta_{ТН} = 0,5 \dots 0,55$, а для випадку подачі у випарник ТН рідин – $\eta_{ТН} = 0,6 \dots 0,7$ [12].

Теоретичний коефіцієнт трансформації ТН можна визначити зі зворотного циклу Карно за рівнянням

$$\phi_T = \frac{T_k^{ТН}}{T_k^{ТН} - T_b^{ТН}} = \left[1 - \frac{T_b^{ТН}}{T_k^{ТН}} \right]^{-1} = \left[1 - \frac{273 + t_t^{вих} - \Delta t_{вип}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]^{-1}, \quad (3)$$

де $T_b^{ТН}$ – температура випаровування робочого агента у випарнику ТН, К; $T_k^{ТН}$ – температура конденсації робочого агента в конденсаторі ТН, К; $t_t^{вих}$ – температура теплоносія на виході з випарника ТН відповідно, °С; $\Delta t_{вип}$ – різниця температур теплоносія та робочого тіла ТН на виході з випарника ТН, °С; t_k – температура води на виході з конденсатора ТН, °С; Δt_k – різниця температур робочого тіла ТН та теплоносія на виході із конденсатора ТН, °С.

Гранична (теоретична) ефективність роботи ТН обмежується другим законом термодинаміки (теоремою Карно) і визначається виключно температурами вилучення та віддачі теплоти. Залежність теоретичних коефіцієнтів ефективності парокомпресійних ТН від температур вилучення та віддачі теплоти, зображена графічно на рис. 2.

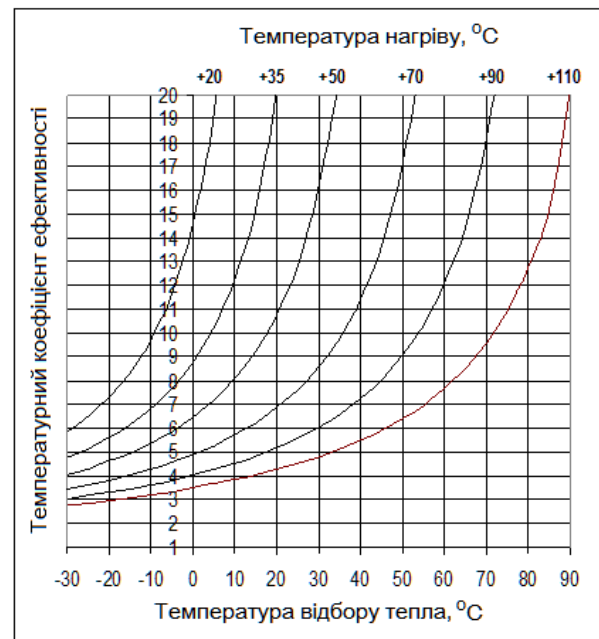


Рис. 2. Теоретична ефективність теплового насоса

Існує обмеження температури теплоносія на виході з ТН і максимальна температура, яку може забезпечити ТН, зазвичай, становить 65 °С, у окремих моделях до 75 °С. Для того, щоб ТН міг працювати протягом усього опалювального періоду та максимально реалізувати свій енергозберігаючий потенціал, необхідно забезпечити використання

низькотемпературних систем опалення з максимальними температурами у подавальній та зворотній лініях не вище 70 і 50°C, відповідно. Однак для низькотемпературних систем потрібна збільшена площа опалювальних приладів порівняно з традиційними опалювальними системами, розрахованими на температурний графік 95/70°C. Це тягне за собою додаткові витрати.

Запобіжним заходом для наведених вище обмежень може бути зменшення температури вихідного теплоносія: наприклад, нагрівання зворотної води в тепломережі (для зменшення витрат викопного палива на догрів води паливними котлами до нормативних вимог) або зменшення нормативних вимог до температури подавальної води в тепломережі, що може призвести до збільшення поверхні теплообміну нагрівальних пристроїв в помешканнях.

ТНС повинна бути спроектована так, щоб коефіцієнт сезонного перетворення досягав свого найбільшого значення. В табл. 1 наведені мінімальні та розрахункові значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення SPF для опалення приміщень і системи гарячого водопостачання (ГВП), а також для систем, орієнтованих тільки на системи ГВП [23].

Обмеження щодо рівня енергоефективності ТНУ визначаються витратами первинного палива, які у свою чергу залежать від ККД виробництва і транспортування електроенергії. Якщо прийняти кінцевий ККД виробництва електроенергії у споживача на рівні 0,3, то тоді середньо сезонний коефіцієнт трансформації енергії в ТНУ не повинен бути менше 3. При цьому необхідно враховувати споживання електроенергії не тільки безпосередньо ТН, а також допоміжним обладнанням ТНУ – нагнітачами (насос, вентилятор тощо).

Таким чином, одне з основних питань, яке в значній мірі визначає вибір тієї чи іншої системи теплопостачання, може бути вирішене на основі енергетичного аналізу, що зводиться до зіставлення витрат первинної енергії палива. Тому необхідно визначити енергетичну ефективність ТНУ опалення порівняно з традиційними систе-

мами з точки зору споживання первинної енергії палива. У зв'язку з цим на основі отриманих даних [12] оптимальної глибини використання джерел НПТ в ТНС теплопостачання за умов мінімальних затрат енергії як на підвищення потенціалу цієї теплоти, так і на переміщення теплоносія в нижньому контурі ТН, нижче розглянуто енергетичні показники різних систем опалення задля визначення умов ефективного використання ТНС опалення на противагу традиційним системам з використанням як джерела теплоти опалювальної котельні та конденсаційного котла.

Коефіцієнт використання первинної енергії палива опалювальною котельнею визначаються за залежністю

$$\eta_{ок} = \eta_{ку} \eta_{тм}, \quad (4)$$

де $\eta_{ку}$ – ККД котельної установки; $\eta_{тм}$ – ККД теплової мережі.

Коефіцієнт використання первинної енергії палива ТНУ буде рівним

$$\eta_{тну} = \eta_{кес} \eta_{тн} \eta_{т}, \quad (5)$$

де $\eta_{кес}$ – ККД електростанції.

Для визначення ефективності ТНУ як теплогенеруючого джерела порівняно з теплопостачанням від опалювальної котельні (як з традиційними водогрійними котлами, так і з конденсаційними котлами) використаємо відносний енергетичний ККД, який являє собою відношення коефіцієнтів використання первинної енергії палива для вказаних систем (4) і (5) та записується у такому вигляді

$$\eta_{тну}^0 = \frac{\eta_{кес} \eta_{тн} \eta_{т}}{\eta_{ку} \eta_{тм}}. \quad (6)$$

Поточні розрахунки проводимо за умови таких даних: ККД водогрійного котла $\eta_{ку} = 0,85$; ККД конденсаційного котла при віднесенні його до нижчої теплоти згорання палива Q_n^p $\eta_{ку} = 1,05$; коефіцієнт корисної дії теплової мережі $\eta_{тм} = 0,95$, а у разі використання конденсаційного котла $\eta_{тм} = 1$; ККД конденсаційної електростанції $\eta_{кес} = 0,37$; коефіцієнт втрат ТН $\eta_{тн} = 0,6$.

Теоретичний коефіцієнт трансформації ТН, який з урахуванням теплових необоротностей у випарнику та конденсаторі ТН визначається за

Таблица 1

Мінімальні та розрахункові значення середнього за сезон коефіцієнта перетворення теплового насоса

Джерело НПТ / відведення теплової енергії	Опалення і ГВП для нових будинків		Опалення і ГВП для оновлених будинків		Система ГВП	
	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове	Мінімальне	Розрахункове
Повітря / вода	2,7	3,0	2,5	2,8	2,3	2,8
Ґрунт/вода	3,5	4,0	3,3	3,7	3,0	3,5
Вода/вода	3,8	4,5	3,5	4,2	3,2	3,8

виразом (3) при цьому температура теплоносія на вході до випарника ТН $t_t^{вх}$ приймається з урахуванням вибраного нижнього джерела теплоти відповідно для: атмосферного повітря $-20^{\circ}\text{C} \dots 15^{\circ}\text{C}$; вентиляційних викидів споруд 20°C ; природної та скидної води 8°C ; ґрунту з температурою теплоносія 3°C .

Температура теплоносія на виході із випарника ТН визначається з урахуванням оптимальної різниці температур за співвідношенням [12]

$$\Delta t_t^{опт} = \sqrt{\frac{A(273 + t_k + \Delta t_k)}{\eta_t^{зб.р} \eta_{пп}}} \left[\eta_{тн} - 1 + \frac{273 + t_t^{вх} - \Delta t_{вип}}{273 + t_k + \Delta t_k} \right]. \quad (7)$$

Температура теплоносія, що подається в низькотемпературну систему водяного опалення, залежно від зміни температури навколишнього середовища визначається за виразом [12]

$$t_k = t_n + (t_t^p - t_n) \left[\frac{(t_n - t_0)}{(t_n - t_0^p)} \right]^{\frac{1}{(1+n)}}. \quad (8)$$

При виконанні розрахунків розглядалась низькотемпературна система опалення з температурою гріючого теплоносія $t_t^p = 40^{\circ}\text{C}$; розрахункова температура в опалювальному приміщенні $t_n = 20^{\circ}\text{C}$; середня розрахункова температура на опалення по Україні $t_0^p = -20^{\circ}\text{C}$.

За описаним вище алгоритмом розрахунку встановлено основні показники роботи теплонасосної системи опалення та, як наслідок, визначено ефективності її роботи. ТНС опалення буде раціонально використовувати у всіх випадках, коли відношення коефіцієнтів використання первинної енергії палива для вказаних систем буде більшим за одиницю, тобто у всіх точках, які розміщені вище умовної прямої $\eta_{тнс}^0 = 1$.

З наведених графічних залежностей на рис. 3 видно, що при забезпеченні оптимального ступеня охолодження теплоносія (атмосферного пові-

тря, ґрунту та води) у випарнику ТН відносний енергетичний ККД для всіх наведених випадків більший за одиницю ($\eta_{тнс}^0 > 1$), крім порівняння конденсаційного котла з ТНС, яка працює за рахунок використання теплоти атмосферного повітря. В цьому випадку поле графіка на рис. 3, б поділяється на дві характерні зони, в яких використання ТНС є ефективним ($\eta_{тнс}^0 > 1$) або неефективним ($\eta_{тнс}^0 < 1$) з точки зору величини коефіцієнта використання первинної енергії палива порівняно з конденсаційним котлом.

Джерела НПП. Перешкодами, обумовленими джерелами НПП, для впровадження ТН технологій у СЦТ є мала загальна потужність цих джерел, незначна питома щільність теплоти від джерел НПП (на м^2 або на м^3 джерела), їх сезонність (зміна температури повітря, води у водоймищах, ґрунту до надмірного охолодження) та віддаленість джерел від теплових мереж СЦТ (споживача) та мереж електропостачання. В таблиці 2 представлені питомі потреби в нижньому джерелі НПП для ТН.

Також слід відмітити, що у випадку використання теплоти ґрунту за допомогою горизонтальних колекторів для ТНУ, тепловіддача різних ґрунтів змінюється в діапазоні $10\text{--}35 \text{ Вт/м}^2$ (для оціночних розрахунків прийнято 20 Вт/м^2), а для вертикальних ґрунтових зондів – $45\text{--}50 \text{ Вт/м}$ довжини, глибина свердловин сягає до 200 м , відстань між ними становить $5\text{--}15 \text{ м}$. Для ТН тепловою потужністю 1 МВт горизонтальний колектор буде займати площу 500000 м^2 , а для вертикальних зондів знадобиться 200 стометрових свердловин, які займуть площу близько 44000 м^2 . Безумовно, що в умовах щільної забудови великих міст та дефіциту вільних майданчиків викорис-

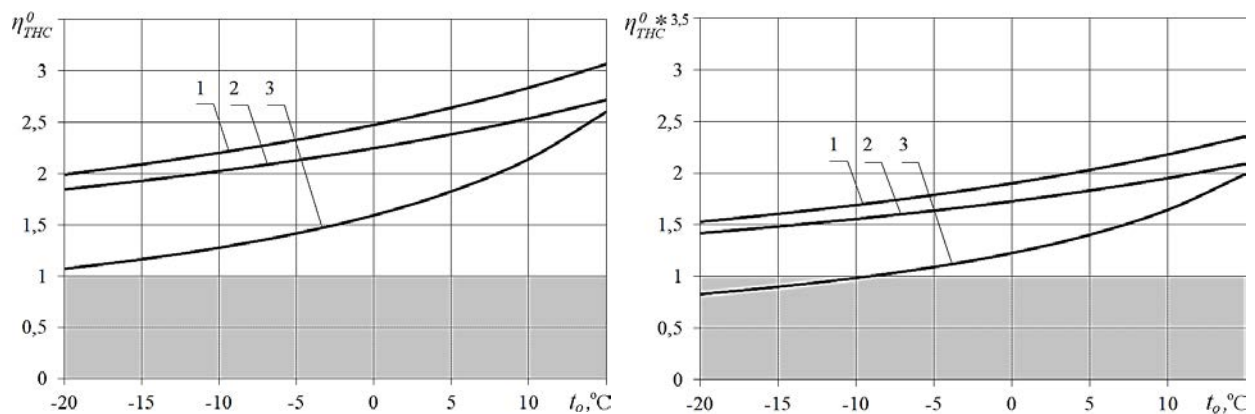


Рис. 3. Залежності відносного енергетичного ККД від температури навколишнього середовища при порівнянні ТНУ з використанням теплоти: 1 – атмосферного повітря; 2 – ґрунту; 3 – води; а) з традиційними водогрійними котлами, б) з конденсаційними котлами

Питомі потреби в нижньому джерелі НПТ для ТН приведені до 1 МВт джерела теплоти для теплового насосу

Джерело теплоти	Температурний потенціал, °С	Розрахунковий температурний потенціал, °С	Доступне оптимальне охолодження, °С	Питома витрата, м ³ /год	Теплоносій зі сторони випарника
Шахтна вода	14..30	25	10	86	забруднена шахтна вода
Скид очисних споруд	14..18	16	7	123	стоки або антифриз
Скидна теплота градирень	25..45	35	20	43	вода градирень
Вентиляційні викиди метро	18..25	20	10	360	вода або антифриз
Системи охолодження датацентрів	35..40	40	20	43	антифриз
Морська вода	14..25	16	6	143	антифриз 20-30%
Річкова вода	4..8	5	3	287	антифриз 30-45%
Озерна вода	3..5	4	2,5	344	антифриз 30-45%
Ґрунт	-2..3	0	2	430	антифриз 30-45%
Геотермальні води	40..90	80	50	17	вода

тання ґрунтових джерел НПТ буде дуже проблематичним [17, 20].

Найбільш привабливими джерелами НПТ для усунення наведених перешкод є промислове або каналізаційне скидне тепло, однак джерела НПТ від навколишнього середовища можуть бути ефективно використані для гібридних умовно централізованих систем тепlopостачання для закладів освіти, охорони здоров'я, культури та спорту, а також адміністративних та житлових будівель для гарячого водопостачання в неопалювальний період року з розташуванням ТН безпосередньо поблизу цих будівель та закладів.

Теплові та електричні мережі. Обмеження по вихідній температурі ТНУ зі сторони тепломереж, які експлуатуються за температурним графіком 150/90°С в опалювальний період, є основною перешкодою для впровадження ТН технологій в СЦТ. Запобіжним заходом для усунення цього обмеження може бути зменшення температури вихідного теплоносія: наприклад, нагрівання зворотної води в тепломережі (для зменшення витрат викопного палива на догрів води паливними котельнями до нормативних вимог).

Другим суттєвим обмеженням для впровадження ТН технологій є високовартісні заходи з під'єднання ТНУ до електромережі. Запобіжним заходом для усунення цієї перешкоди є засто-

сування державної компенсації частки витрат на під'єднання ТНУ до електромережі.

Споживання теплової енергії. Невідповідність графіка теплового навантаження і можливого підводу – відводу теплоти від ТНУ. Необхідність забезпечення змінних навантажень на СЦТ обумовлене наступними факторами: максимальне навантаження опалення на 50–100% вище середньосезонного показника, а максимальне навантаження гарячого водопостачання у 2–5 разів вище середньодобового, що є основними перешкодами впровадженню ТН у СЦТ.

Перешкоди, обумовлені розбіжністю графіка необхідних теплових навантажень генерації та споживання теплової енергії і можливостей підведення чи відведення теплоти з циклу ТНУ, можуть бути усунені для добового вирівнювання графіку роботи ТН шляхом використання теплових акумуляторів, а для сезонного вирівнювання – використанням паливних котлів у гібридних системах.

В таблиці 3 узагальнено вище перераховані технічні бар'єри впровадження ТН технологій у СЦТ та наведені запобіжні заходи по їх усуненню або зменшенню негативного впливу.

Висновки. Неминуче постійне підвищення ціни на викопні палива, в тому числі і на природний газ призводить до зростання конкурентоздатності ТН порівняно з існуючими традиційними

Технічні бар'єри та заходи з їх усунення

Технічні бар'єри:	Запобіжні заходи:
Обмеження щодо рівня енергоефективності ТН	Вибір ТН з високим коефіцієнтом перетворення (COP > 3,5)
Обмеження температури на виході з ТН (65–75°C)	Планування використання низькотемпературного обігріву під час будівництва нових житлових масивів. Приспівання ТН до зворотного трубопроводу СЦТ.
Перешкоди, обумовлені властивостями джерел низькопотенційної теплоти	Вибір відповідного джерела низькопотенційної теплоти. Часткове покриття теплового навантаження іншими теплогенеруючими технологіями (гібридні СЦТ).
Висока вартість під'єднання до електромережі	Часткова державна компенсація витрат на під'єднання ТН до електромереж
Перешкоди, обумовлені розбіжністю добових та сезонних графіків теплових навантажень (споживання) теплової енергії і можливостей ТН	Використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій

системами теплогенерації, що має привести до їх широкого впровадження в Україні. Використання ТН дозволить зменшити витрати на опалення, зменшити залежність від імпортованого природного газу, сприятиме екологічно чистому теплопостачанню і загальному зменшенню викидів шкідливих та парникових газів. Таким чином, однією з найбільш очікуваних змін у структурі енергетичного балансу України є активне впровадження ТН технологій у теплопостачання, оскільки їх використання приносить значні економічні, енергозберігаючі та екологічні переваги.

Ідентифіковано та систематизовано основні групи технічних бар'єрів, які перешкоджають широкому впровадженню ТН в СЦТ: безпосередньо спричиненні самим тепловим насосом; джерелами низькопотенційної теплоти; підключенням до теплових та електричних мереж; умовами споживання теплової енергії кінцевим споживачем. Переважані запобіжні заходи по усуненню або змен-

шенню їх, які повинні бути враховані ще на етапі проектування об'єктів, а саме вибір ТН з високим коефіцієнтом трансформації теплоти (COP > 3,5), використання низькотемпературної системи опалення; визначенні можливі заходи щодо зниження енергетичних навантажень традиційними способами: аналіз структури споживання енергії (теплової та електричної) з врахуванням добові та сезонних графіків споживання теплової й електричної енергії (використанням теплових акумуляторів та резервних теплогенеруючих технологій).

Крім високої ефективності використання енергії, робота ТН має також інші важливі переваги, такі як екологічна безпека, надійність, адаптивність до різних потужностей і джерел НПТ, безпечність та повна автоматизація робочих режимів. Все це підкреслює перспективність ТН і значний потенціал їх впровадження у системах теплопостачання, що підтверджується світовим досвідом їхнього використання.

Список літератури:

1. Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary A review of data-driven building energy consumption prediction studies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81 (2018) 1192-1205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>
2. European Commission (2022), REPowerEU Plan. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
3. IRENA (2023), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, Volume 1, International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
4. IRENA (2020), *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050* (Edition: 2020), International Renewable Energy Agency. URL: <https://www.irena.org/Publications>
5. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*. V. 68, Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
6. Revesz A., Jones P., Dunham C., Davies G., Marques C., Matabuena R., Scott J., Maidment G. (2020). Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*. V. 201, 117389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117389>
7. Buffa S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 104, Pp. 504-522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>
8. Wirtz M., Heleno M., Moreira A., Schreiber T., Müller D. (2023). 5th generation district heating and cooling network planning: A Dantzig–Wolfe decomposition approach. *Energy Conversion and Management*. V. 276, 116593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116593>

9. Heat Roadmap Europe. Quantifying the Impact of Low-carbon Heating and Cooling Roadmaps. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5be2fd8fb&appId=PPGMS>
10. Susana Paardekooper. Heat Roadmap Europe – a Vision for 2050. Brussels, February 13th, 2019. URL: https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/04/Susana-Paardekooper_Aalborg-University.pdf
11. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text>
12. Безродний М.К. Термодинамічна та енергетична ефективність теплонасосних схем теплопостачання: монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. – 272 с.
13. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. URL: <https://www.nerc.gov.ua/monitoring-rinku-prirodnogo-gazu/rezultati-monitoringu-rinku-prirodnogo-gazu>
14. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії/ під заг. ред. А.К. Шидловського. Київ: Українські енциклопедичні знання. 2007. 560 с.
15. Снежкін Ю.Ф. Енергоефективні теплонасосні технології: стан та перспективи їх впровадження в Україні. Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39, № 2. С. 18–24.
16. Відновлювані джерела енергії: монографія / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
17. Карп І.М. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні / І.М. Карп, Є.Є. Нікітін, К.Є. П'яних. – Київ: Наукова думка. 2021. 264 с.
18. Derii V.O., Teslenko O.I., Sokolovska I.S. (2023) Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. Energy Technologies & Resource Saving. №2. Pp. 44-56. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03>
19. Ткаченко С.Й. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання: монографія / С.Й. Ткаченко, О.П. Остапенко. – Вінниця: ВНТУ, 2009. 176 с.
20. Лобунець Ю.М. Застосування термоелектричних теплових насосів у системах централізованого теплопостачання. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2020. № 2. С. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2020.02>
21. Дерій В.О., Соколовська І.С., Тесленко О.І. Огляд джерел низькопотенційної теплоти для теплонасосних установок систем централізованого теплопостачання. Проблеми загальної енергетики. 2022. Вип. 1-2 (68-69). С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/page2022.01-02.030>
22. EHPA market report 2023 Executive-Summary. European Heat Pump Association. <https://www.ehpa.org/news-and-resources/press-releases/market-report-2023/>
23. ДСТУ Б В.2.5-44:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD) [Текст]. – Чинний від 2010-09-01. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. IV, 57 с.

Bezrodny M.K., Teslenko O.I., Prytula N.O., Derii V.O., Slizhevskiy K.D. TECHNICAL BARRIERS TO IMPLEMENTATION OF HEAT PUMPS TECHNOLOGY IN CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS

The current state and prospects for the introduction of heat pumps in centralized heat supply systems are analyzed. The world experience of using renewable energy and forecasts of transformations of the fuel and energy complex both in the world and in Ukraine are presented. The world community considers the use of renewable energy sources as one of the most promising ways to solve the growing problems of energy supply. The importance of the transition to housing construction with renewable energy systems and low-carbon technologies to ensure heat supply is noted. The economically available energy potential of heat energy production by heat pumps in the centralized heat supply systems of Ukraine from various sources of low-potential heat of natural and anthropogenic origin is presented. The classification of technical barriers is presented. Technical barriers to the implementation of heat pump systems were divided into four main groups, which are determined by the technical and technological features of the components of these systems, namely: heat pumps directly, low-potential heat sources, heat and electrical networks, as well as the conditions of heat energy consumption. Ways to overcome them to ensure widespread use of heat pumps in Ukraine are shown. A comparison of heat pump heating schemes under optimal operating conditions with traditional systems (with water heating and condensing boilers) was made. It was determined that the introduction of heat pump systems of heat supply under optimal conditions of their use are competitive compared not only to traditional boiler houses, but also to condensing boilers. When heat pump installations use sources of low-potential heat of natural origin, one should also take into account the obstacles caused by the discrepancy between the daily and seasonal schedules of heat loads (consumption) of thermal energy and the capabilities of the heat pump.

Key words: centralized heat supply, heat pump, implementation, barriers, low-potential heat sources.