

УДК 621.577
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).21](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).21)

SEASONAL COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF THE HEAT PUMP

СЕЗОННИЙ КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ

Oleh Yu. Menzhynskyi
o.menzhynskyi@kpi.ua
ORCID: 0009-0008-2847-8547
Andrii S. Solomakha
a.solomakha@kpi.ua
ORCID: 0000-0002-1061-6277

О. Ю. Менжинський,
аспірант
А. С. Соломаха,
канд. техн. наук, доцент

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. The relevance of the energy efficiency issue is increasing every year, as greenhouse gas emissions and rising energy consumption are key challenges for the global community. Heat pumps (HPs) are considered one of the most promising technologies for providing heating and hot water supply due to their ability to utilize renewable environmental energy sources (air, ground, water). This reduces the consumption of fossil fuels and the associated CO₂ emissions.

In the European and global context, heat pumps are supported by directives and regulations, notably the ErP (Energy-related Products Directive) and Directive 2018/844/EU on the energy performance of buildings. EU countries are actively transitioning to low-carbon heating systems, with heat pumps playing a leading role. However, one of the most important characteristics of a heat pump is the Seasonal Coefficient of Performance (SCOP), which reflects the actual energy efficiency under varying climatic conditions throughout the heating season.

In Ukraine, the use of heat pumps is only beginning to gain widespread adoption. The main obstacle is the lack of extensive experimental data and substantiated methods for calculating SCOP specifically for the Ukrainian climate. Most technical solutions are based on European norms and standards (EN 14511, EN 16147), but their direct application to local conditions often requires additional verification and adaptation.

Thus, researching and determining the Seasonal Coefficient of Performance is extremely important for designers, manufacturers, and consumers. Knowledge of SCOP allows for a more accurate assessment of energy consumption and economic indicators of the system, takes into account the influence of real climatic patterns and temperature fluctuations, and optimizes the operating modes of the heat pump.

Purpose. The aim of the article is to analyze current experimental and theoretical studies that determine the Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) of heat pumps, to summarize the methods of its calculation, and to identify the key factors influencing SCOP under real operating conditions, taking into account the climatic characteristics of Ukraine.

Method. The research is based on the analysis of international standards and adaptation methods for SCOP calculation under local climatic conditions. The methodology integrates both theoretical models and climatic data relevant to Ukraine.

Results. A calculation method for determining the Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) of air-source and ground-source heat pumps has been established.

Scientific novelty. Thus, the research and determination of the Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) is extremely important for designers, manufacturers, and consumers. Understanding SCOP enables a more accurate assessment of the system's energy consumption and economic performance, takes into account the actual climatic conditions and temperature fluctuations, and helps optimize the operating modes of the heat pump.

Practical importance. In Ukraine, the use of heat pumps is only beginning to gain widespread adoption. The main obstacle is the lack of a large amount of accessible experimental data and well-founded calculation methods for SCOP under the specific conditions of the Ukrainian climate. Most technical solutions are based on European norms and standards (EN 14511, EN 16147); however, their direct application to local conditions often requires additional verification and adaptation.

Key words: Seasonal Coefficient of Performance (SCOP); heat pumps; energy efficiency; heating; climatic conditions; energy consumption.

Анотація. Актуальність проблеми енергоефективності зростає з кожним роком, оскільки викиди парникових газів та збільшення споживання енергії є ключовими викликами для світової спільноти. Теплові насоси (ТН) розглядаються, як одна з найперспективніших технологій для забезпечення опалення та гарячого водопостачання, завдяки здатності використовувати відновлювані джерела енергії довкілля (повітря, ґрунт, воду). При цьому скорочується споживання викопного палива та пов'язані з цим викиди CO₂.

У європейському та світовому контексті теплові насоси підтримуються директивами та регламентами, зокрема ErP (Energy-related Products Directive) і Директивою 2018/844/EU щодо енергоефективності будівель. У країнах ЄС спостерігається активний перехід на низьковуглецеві системи опалення, де ТН займають провідне місце. Однак однією з найважливіших характеристик теплового насоса є сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP, Seasonal Coefficient of Performance), який відображає реальну енергоефективність при змінних кліматичних умовах впродовж опалювального періоду.

В Україні використання теплових насосів лише починає набирати обертів. Основною перешкодою є відсутність достатньої експериментальної бази та обґрунтованих методик розрахунку SCOP саме для українських кліматичних умов. Більшість технічних рішень базуються на європейських нормах і стандартах (EN 14511, EN 16147), однак їх пряме застосування до локальних умов часто потребує додаткової перевірки та адаптації. Тому дослідження та визначення сезонного коефіцієнта ефективності є надзвичайно важливими для проєктувальників, виробників та споживачів. Знання SCOP дозволяє точніше оцінити енергоспоживання та економічні показники системи, врахувати вплив реальних кліматичних умов і температурних коливань, а також оптимізувати режими роботи теплового насоса.

Мета. Мета статті – проаналізувати актуальні експериментальні та теоретичні роботи, в яких визначається сезонний коефіцієнт ефективності теплових насосів, узагальнити методики його розрахунку та визначити ключові фактори, що впливають на SCOP у реальних умовах експлуатації, з урахуванням українських кліматичних особливостей.

Методика. Дослідження базується на аналізі міжнародних стандартів та методів адаптації для розрахунку SCOP в місцевих кліматичних умовах. Методологія інтегрує як теоретичні моделі, так і кліматичні дані, що стосуються України.

Результати. Визначена методика розрахунку сезонного коефіцієнту ефективності повітряного та ґрунтового теплового насосу.

Наукова новизна. Таким чином, дослідження та визначення сезонного коефіцієнта ефективності є надзвичайно важливим для проєктувальників, виробників та споживачів. Знання SCOP дозволяє, точніше оцінити енергоспоживання та економічні показники системи, врахувати вплив реальної кліматичної картини та температурних коливань, оптимізувати робочі режими теплового насоса.

Практична значимість. В Україні застосування теплових насосів лише починає набувати широкого розповсюдження. Основною перешкодою є відсутність великої кількості доступних експериментальних даних та обґрунтованих методик розрахунку SCOP в умовах саме українського клімату. Більшість технічних рішень базуються на європейських нормах і стандартах (EN 14511, EN 16147), проте їх безпосереднє перенесення на місцеві умови часто потребує додаткових перевірок та адаптації.

Ключові слова: сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP); теплові насоси; енергоефективність; опалення; кліматичні умови; енергоспоживання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Європейські стандарти EN 14511 та EN 16147 встановлюють чіткі технічні вимоги й методики тестування теплових насосів, щоб гарантувати їхню енергоефективність і безпеку. Ці стандарти служать основою для оцінки продуктивності обладнання в ЄС, використовуються для сертифікації і порівняння різних моделей.

Втім, просто взяти і застосувати їх без адаптації в Україні – не найкраща ідея. Наш клімат суттєво відрізняється від європейського середнього, і це впливає на сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP) теплових насосів. Тому, якщо ігнорувати регіональні особливості, можна отримати некоректні результати, що призведе до помилок у проєктних розрахунках і сумнівної економічної вигоди від впровадження цих технологій.

Отже, зараз дуже важливо розробити адаптовані методики розрахунку і випробувань SCOP, які враховують український клімат і реальні умови експлуатації. Це підвищить точність оцінок, допоможе вибрати оптимальне обладнання і сприятиме більш широкому використанню теплових насосів у нас.

Щодо стандартів: EN 14511 – це європейський документ, що задає технічні вимоги до теплових насосів, кондиціонерів та комбінованих систем опалення і охолодження. Він описує, як проводити випробування, класифікувати і визначати енергетичні характеристики таких систем, зокрема коефіцієнт ефективності (COP) і сезонну ефективність. Таким чином, він встановлює уніфіковані правила для сертифікації і порівняння.

EN 16147 – це стандарт, який регламентує вимоги до побутових теплових насосів для гарячого

водопостачання. Він визначає критерії енергоефективності, способи вимірювання споживаної енергії та теплової потужності, а також умови випробувань, щоб результати були надійними й порівнюваними. Цей стандарт допомагає споживачам робити свідомий вибір енергоефективних рішень для домашнього гарячого водопостачання.

Обидва стандарти дозволяють порівнювати різні типи обладнання, але не завжди точно відображають реальні умови конкретного регіону. Тому при проектуванні важливо враховувати локальний клімат або, якщо можливо, проводити власні випробування на місцях.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Добре відомо, що енергетичну ефективність теплового насоса розраховують за допомогою опалювального коефіцієнта (COP, coefficient of performance), який визначається як [1]:

$$COP = \frac{Q_t}{E_{\text{ел}}}$$

де Q_t – це тепловий потік, що передається в систему опалення, кВт; $E_{\text{ел}}$ – це спожита електрична енергія для забезпечення цього теплового потоку, кВт.

Як відомо, COP сильно залежить від температури теплоносіїв. Тому завжди важливо вказувати, для яких температур (конденсації та кипіння, теплоносія і т.д.) вказаний даний коефіцієнт енергетичної ефективності. Для точної оцінки енергоефективності необхідно враховувати також ряд інших факторів. Оскільки, умови роботи теплового насоса змінюються протягом сезону, то логічно розраховувати витрату теплоти та споживання енергетичної енергії за сезон. В цьому випадку можна розрахувати сезонний коефіцієнт енергетичної ефективності (SCOP, seasonal coefficient of performance) [2]:

$$SCOP = \frac{\sum Q_t}{\sum E_{\text{ел}}}$$

де $\sum Q_t$ – це теплове навантаження або кількість тепла, що була – передана до будівлі за сезон, кВт·год.
 $\sum E_{\text{ел}}$ – це кількість електричної енергії, витраченої на роботу теплового насоса за цей же період, кВт·год.

Такий показник дає можливість більш точно оцінити ефективність роботи теплового насоса, особливо в перехідні періоди. Він також дозволяє більш точно порівнювати між собою різні моделі теплових насосів.

Зокрема, в роботі [2] виконано порівняння ефективності ґрунтових (GSHP) і повітряних (ASHP) теплових насосів для будинків в Канаді. GSHP показує стабільну ефективність у холодних умовах, тоді як ASHP має вищий COP у помірному кліматі. Результати показали, що ґрунтовий тепловий насос

забезпечує стабільнішу роботу завдяки більш стабільній температурі ґрунту, тоді як повітряний тепловий насос суттєво втрачає ефективність за низьких температур. Оцінка SCOP для обох систем була проведена з використанням моделювання TRNSYS, і результати демонструють, що для холодних кліматів GSHP є кращим вибором.

В роботі [1] проаналізовано енергетичну ефективності гібридних систем, в яких одночасно працюють теплові насоси та котли. Розглянуто, як вибір потужності теплового насоса та температура відключення теплового насоса впливають на SCOP в холодному та м'якому кліматі. Моделювання в TRNSYS демонструє, що для більш холодних кліматів гібридні системи з оптимальною температурою відключення забезпечують найбільшу економічну вигоду.

В роботах [3; 4; 5] розглянуто різні способи та технології управління та підвищення SCOP. В роботі [3] досліджується застосування предиктивного управління (прогноз майбутніх станів системи) для підвищення ефективності теплових насосів типу «повітря-вода». Результати показали, що застосування предиктивного управління підвищує SCOP на 23 %, дозволяючи оптимізувати роботу насосів, зменшуючи кількість запусків і продовжуючи термін служби обладнання. Це також дозволяє краще використовувати відновлювані джерела енергії, такі як сонячна і вітрова енергія. В продовження даного дослідження, в наступній роботі [4] вивчено вплив прогнозованого управління тепловими насосами, що в основному працюють на відновлюваних джерелах енергії. Особлива увага приділяється роботі з максимальним залученням сонячної та вітрової енергії. Показано, що таке керування з прогнозуванням дозволяє збільшити SCOP до 14 %, знижуючи енергоспоживання і підвищуючи економічну ефективність системи.

Для прогнозного управління підвищення SCOP завдяки оптимізації роботи системи в найтепліші години доби враховується формулою:

$$SCOP_n = SCOP_{\text{ст}} (1 + \Delta SCOP_{\text{упр}})$$

де $SCOP_n$ – це новий SCOP після застосування прогнозного управління, $SCOP_{\text{ст}}$ – стандартний SCOP без застосування управління, $\Delta SCOP_{\text{упр}}$ – приріст SCOP завдяки оптимізації та прогнозуванню температур.

Робота [5] фокусується на впливі на SCOP стратегій управління і використання низькотемпературних теплових акумуляторів теплових насосів у Центральній Європі. Результати дослідження показали, що застосування розглянутих стратегій керування може призвести до збільшення SCOP до 5,19 %. Це досягається завдяки простим змінам у програмному забезпеченні алгоритму керування тепловим насосом та інтеграції з прогнозними даними про метеорологічні умови та стратегії управління низькотемпературними тепловими акумуляторами в комбінаціях з тепловими насосами.

Вплив кліматичних умов на ефективність теплових насосів досліджено в роботі [6]. Результати показали значну різницю в ефективності теплових насосів залежно від місцевих кліматичних умов, зокрема в умовах польського клімату, де SCOP може змінюватися на 30 % в залежності від регіону. Автори рекомендують враховувати місцеві кліматичні дані для точніших розрахунків енергетичної ефективності. У статті використовується модель бінів, яка дозволяє враховувати зміну температури зовнішнього середовища в залежності від часу року:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n (COP_i \cdot E_i)$$

де Q_i – кількість тепла, що передано на i -й температурний інтервал, COP_i – коефіцієнт продуктивності на i -й температурний інтервал, E_i – спожита електрична енергія на i -й температурний інтервал.

В роботі [7] аналізується ефективність теплових насосів «повітря-вода» в кліматичних умовах Греції, де температура є важливим фактором для визначення SCOP. Результати показали, що інверторні компресори і оптимальна температура теплоносія можуть значно підвищити ефективність таких систем, зокрема у тепліших кліматах. Клімат та тип компресора мають значний вплив на SCOP, зокрема інверторні компресори покращують ефективність на 2–17 %.

Моделювання і прогнозування показників SCOP виконано в роботі [8]. Оцінка сезонної ефективності теплових насосів «повітря-вода» виконана за допомогою математичної моделі, яка враховує різні режими роботи, в тому числі часткові навантаження, і визначає оптимальні параметри для досягнення високого SCOP. Моделювання показало, що багатокомпресорні та інверторні системи мають кращу продуктивність, оскільки їхня потужність може гнучко регулюватися, що знижує енергетичні втрати. Рекомендації включають вибір інверторних моделей для холодного клімату.

В роботі [9] досліджено використання короткострокового моніторингу для прогнозування SCOP теплових насосів типу «повітря-вода». Автори пропонують нову методику, яка використовує короткострокове збирання даних для більш точного прогнозування ефективності системи. Результати показали, що метод типових метеорологічних днів потребує вибору трьох днів з температурним діапазоном, що покриває понад 50 % періоду опалювального сезону. Досягнуто високої точності прогнозування, що свідчить про ефективність запропонованого підходу.

Температура теплоносія також сильно впливає на ефективність роботи теплових насосів, зокрема на SCOP. В роботі пропонується розраховувати ефективність за формулою:

$$SCOP_{\text{н.т.}} = SCOP_{\text{н.т.}} \cdot (1 + \Delta SCOP_{\text{т}})$$

де $\Delta SCOP_{\text{т}}$ – зміна ефективності в залежності від температури теплоносія.

Дослідження [10] оцінює ефективність комбінації трьох джерел теплоти (підземні води, морська вода і повітря) для теплових насосів, що використовуються в системах централізованого теплопостачання. Результати показали, що комбіноване використання цих джерел дозволяє досягти найвищого SCOP. Підземні води забезпечують стабільну ефективність, особливо взимку, в той час, як повітря та морська вода є більш ефективними влітку. Оцінка ефективності комбінації різних джерел теплоти (підземні води, морська вода, повітря) для теплових насосів у централізованому теплопостачанні.

Вказані формули та підходи до дослідження теплових насосів допомагають більш точно оцінити ефективність теплових насосів і визначити їх сезонну продуктивність залежно від різних чинників, таких як температура, клімат та типи систем управління.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Всі розглянуті дослідження були проведені в країнах Європи. Щодо України, то на даний момент взагалі відсутні дослідження з визначення сезонного коефіцієнту ефективності теплового насосу для наших кліматичних умов.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета статті – проаналізувати актуальні експериментальні та теоретичні роботи, в яких визначається сезонний коефіцієнт ефективності теплових насосів, узагальнити методики його розрахунку та визначити ключові фактори, що впливають на SCOP у реальних умовах експлуатації, з урахуванням українських кліматичних особливостей.

Об'єктом дослідження є сезонний коефіцієнт енергетичної ефективності теплового насосу. Предмет дослідження – параметри, що впливають на його значення.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ.

COP – це показник ефективності, який вимірюють в умовах, які створені в спеціально контрольованому тестовому середовищі, та використовують для порівняння продуктивності різних теплових насосів за конкретних умов випробування. Найчастіше в технічних характеристиках вказується COP, отриманий при температурі навколишнього середовища 7 °C. Очевидно, що конкретне значення коефіцієнту COP не відображає ефективність теплового насосу протягом сезону, коли параметри навколишнього середовища можуть суттєво змінюватися. Для прогнозування ефективності та продуктивності протягом сезону EN 14825 [11] пропонує використовувати сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP), який, як вже було сказано розраховується на основі реальних

експлуатаційних даних процесу опалення приміщення або нагріву води. Процедура розрахунку викладена в EN 14511–3 [12]. Методика розрахунку передбачає наявність даних про погоду, які відсортовані за дискретними температурними групами (так званими «бінами»).

Таким чином, для розрахунку SCOP необхідно визначити кілька важливих параметрів.

Спочатку вибирається еталонна кліматична зона в якій встановлено тепловий насос. В стандарті EN 14825 виділяють три кліматичні зони: Холодна (Cold), Середня (Average) та Тепла (Warm). В стандарті встановлюється певна кількість годин, протягом яких температура зовнішнього повітря знаходиться на заданому рівні, T_j . На рис. 1 наведено ці дані про температуру із стандарту EN 14825 [13]. Зони для холодного, середнього та теплішого клімату базуються відповідно на температурних характеристиках міст Гельсінкі, Страсбурга та Афін. Розрахункова температура (найнижча робоча температура для заданого клімату), T_d , становить мінус 22 °C для холодного клімату, мінус 10 °C для середнього та плюс 2 °C для теплого клімату.

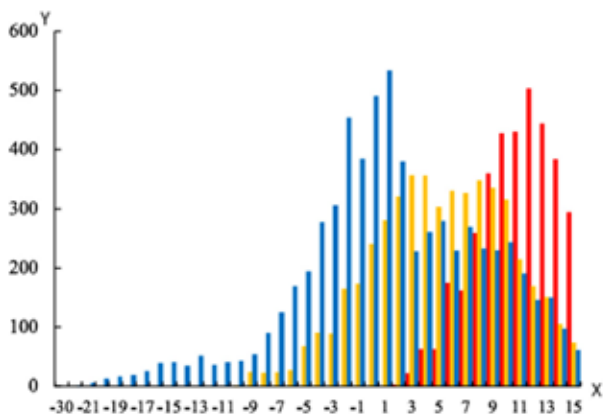


Рис. 1. Кількість годин, що відповідають заданій температурі для різних кліматичних умов Y – кількість годин із заданою температурою; X – температура. Синій колір – холодний клімат; жовтий – середній; червоний – теплий [13]

Потім визначається температура гарячого джерела, яка залежить від типу системи опалення (гарячого водопостачання). Відповідно до рівня температури гарячого джерела в EN 14511–2 та EN 14825 виділяють низькотемпературні системи – 35 °C (наприклад, тепла підлога), з температурою 45 °C (наприклад, радіатори з розвинутою поверхнею), середньотемпературні – 55 °C (наприклад, малі радіатори) та високотемпературні – 65 °C (наприклад, гаряче водопостачання).

Розрахункове теплове навантаження, P_d (кВт), для будівлі, де має бути встановлений тепловий насос, визначається на основі розрахунку загальних втрат теплоти для конкретної будівлі при розрахунковій

температурі. Потім вибирається тепловий насос, який повністю або частково задовольняє потреби в теплоті. Якщо очікується, що тепловий насос задовольнятиме потреби в опаленні при розрахунковій температурі, потужність вибраного теплового насоса повинна бути більшою або дорівнювати P_d .

Умови часткового навантаження, P_h розраховуються за рівнянням:

$$P_h = P_d \left(\frac{T - 16}{T_d - 16} \right).$$

Число 16 відповідає припущенню про граничну температуру в 16 °C, вище якої опалення не потрібне.

Заявлена потужність, коефіцієнт перетворення (COP) та коефіцієнт деградації (C_d) знаходяться з паспортних даних виробника. Ці значення повинні вимірюватися при різному частковому навантаженні щонайменше для 5 різних температур випробування: –15, –7, 2, 7 та 12 °C. Коефіцієнт деградації – це параметр, який використовується для визначення втрати ефективності через циклічне перемикавання, що має місце для блоків з фіксованою потужністю, які не можуть працювати при часткових навантаженнях. Якщо його не вимірюють, то зазвичай приймають рівним 0,9. Для інверторних блоків це значення зазвичай значно вище ($\approx 0,98$ – $0,99$) [11].

Після врахування деградації ефективність теплового насоса, COP_{bin} , розраховується за рівнянням:

$$COP_{bin} = COP_d \left(\frac{CR}{C_d CR + (1 - C_d)} \right)$$

де CR – коефіцієнт потужності. Коефіцієнт потужності – це часткове навантаження, поділене на заявлену потужність при тій самій температурі.

Після збору всіх даних та встановлення погодних та експлуатаційних умов можна розрахувати показники сезонної ефективності.

SCOP розраховується згідно з рівнянням

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}}$$

де Q_H – це річна еталонна потреба в опаленні, розрахована шляхом множення еквівалентних годин роботи теплового насоса в активному режимі, H_{HE} , на розрахункове теплове навантаження, P_d .

$$Q_H = P_d H_{HE}$$

Q_{HE} – річне споживання енергії на опалення

$$Q_{HE} = \frac{Q_H}{SCOP_{on}} + (H_{TO} P_{TO}) + (H_{SB} P_{SB}) + (H_{ck} P_{ck}) + (H_{OFF} P_{OFF})$$

де H_{TO} , H_{SB} , H_{ck} та H_{OFF} – відповідно кількість годин, протягом яких тепловий насос працює в активному режимі, режимі вимкненого термостата, режимі

очікування, режимі підігріву картера та вимкненому режимі, а $P_{\text{ТО}}$, P_{SB} , P_{ck} та P_{OFF} – відповідні потужності для цих режимів, заявлені в технічних паспортах виробника.

Для теплових насосів з інтегрованими баками-акумуляторами гарячої води на енергетичній етикетці також вказується окремий клас ефективності. Він розраховується відповідно до рекомендацій EN 16147 [14], де продуктивність теплового насоса за кількох фаз відбору та нагрівання вимірюється протягом мінімального періоду 24 годин.

Зазвичай значення Q_{HE} невідоме і розрахунково його знайти доволі складно. Тому найчастіше його визначають з реальних експлуатаційних даних працюючого теплового насоса.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сезонний коефіцієнт ефективності (SCOP) є ключовим показником при оцінці теплових насосів, оскільки відображає реальну ефективність системи протягом усього опалювального сезону. Значний вплив на SCOP мають локальні кліматичні умови. Прості стандартні методики можуть давати суттєву похибку, якщо брати середньоевропейські погодні умови. Тому важливо проводити локальні дослідження. Схема «повітря-вода» має вищий потенціал при помірних температурах, але при сильних морозах її ефективність стрімко падає через необхідність розморожування. Схема «грунт-вода» більш стабільна, але дорожча у встановленні.

Сучасні підходи до підвищення SCOP передбачають:

- використання інверторних компресорів;
- предикативне управління та «розумні» алгоритми, що оптимізують роботу насоса за температурою повітря й вартістю електроенергії;
- комбінування з іншими джерелами тепла чи акумулятором для зниження навантаження в «критичних» точках.

ВИСНОВКИ

В Україні практично немає масштабних експериментальних досліджень на комерційних чи житлових об'єктах, що ускладнює точну оцінку економічної доцільності та надійності теплових насосів. Наявні методики переважно узгоджуються зі стандартами EN, але потребують адаптації з огляду на локальний клімат.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- аналіз існуючих об'єктів із реєстрацією усіх параметрів упродовж опалювального сезону;
- розроблення математичних моделей, що враховують типове розподілення температур для різних областей України;
- впровадження систем з низькотемпературними теплоакумуляторами, а також «гібридів» із сонячними колекторами чи котлами, перевірка їх SCOP на практиці.

Таким чином, для забезпечення успішної інтеграції теплових насосів в енергетику України необхідний комплексний підхід, що поєднує стандартизовані випробування згідно з EN 14511, EN 16147 з локальними підтвердженням експериментальних та модельних досліджень.

REFERENCES

- [1] Bagarella, G., Lazzarin, R., & Noro, M. (2016). Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings. *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.089>
- [2] Safa, A., Fung, A., & Kumar, R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, vol. 81, pp. 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.039>
- [3] Pospisil, J., Spilacek, M., & Kudela, L. (2018). Potential of predictive control for improvement of seasonal coefficient of performance of air source heat pump in Central European climate zone. *Energy*, vol. 154, pp. 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.131>
- [4] Pospisil, J., Spilacek, M., & Charvat, P. (2019). Seasonal COP of an Air-to-Water Heat Pump when Using Predictive Control Preferring Power Production from Renewable Sources in the Czech Republic. *Energies*, vol. 12, no. 17, 3236. <https://doi.org/10.3390/en12173236>
- [5] Kudela, L., Spilacek, M., & Pospisil, J. (2021). Influence of control strategy on seasonal coefficient of performance for a heat pump with low-temperature heat storage. *Energy*, vol. 234, 121276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121276>
- [6] Kowalski, P., & Szalanski, P. (2019) Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland. *E3S Web Conf.*, vol. 116, 00039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600039>
- [7] Mouzeviris, S., & Papakostas, K. (2020). Seasonal heat performances of air-to-water heat pumps in the Greek climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 410, 012043. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012043>
- [8] Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. (2015). Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 1072–1081. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.026>
- [9] Sun, X., Wang, Z., Li, X., Xu, Z., Yang, Q., & Yang, Y. (2021). Seasonal heating performance prediction of air-to-water heat pumps based on short-term dynamic monitoring. *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.130>

- [10] Pieper, H., Ommen, T., Elmegaard, B., & Markussen, W.B., (2019). Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating. *Energy*, vol. 176, pp. 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.165>
- [11] EN 14825: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. Retrieved from: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/9fcc3835-2b65-478e-920e-3f3bacb6d2c5/en-14825-2022?srsId=AfmBOoCcXSU41E8JPj7vEtjyK-edvhcvXVGeNg_NGV7ebKkLRednJCg
- [12] EN 14511: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Retrieved from: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/93a37503-c91b-49dc-ad23-82ec9715acf1/en-14511-1-2022?srsId=AfmBOoqrSY8YxW_dHO7ifcsWK7BW748oVpXGzfQJa21PMV6pHrQF52vw
- [13] O’Hegarty, R., Kinnane, O., Lennon, D., & Colclough, S. (2022). Air-to-water heat pumps: Review and analysis of the performance gap between in-use and product rated performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111887>
- [14] EN 16147: Heat pumps with electrically driven compressors – Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units. Retrieved from: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/94e7aca8-ef04-4c14-b33f-815ae9d86e04/en-16147-2017?srsId=AfmBOoq0R71O9EMTxMhARuxSfONAYlHx5jcpPPWUYEkvXpPVYjoTicVV>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Bagarella, G., Lazzarin, R., & Noro, M. (2016). Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings. *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.089>
- [2] Safa, A., Fung, A., & Kumar, R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, vol. 81, pp. 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.039>
- [3] Pospisil, J., Spilacek, M., & Kudela, L. (2018). Potential of predictive control for improvement of seasonal coefficient of performance of air source heat pump in Central European climate zone. *Energy*, vol. 154, pp. 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.131>
- [4] Pospisil, J., Spilacek, M., & Charvat, P. (2019). Seasonal COP of an Air-to-Water Heat Pump when Using Predictive Control Preferring Power Production from Renewable Sources in the Czech Republic. *Energies*, vol.12, № 17, 3236. <https://doi.org/10.3390/en12173236>
- [5] Kudela, L., Spilacek, M., & Pospisil, J. (2021). Influence of control strategy on seasonal coefficient of performance for a heat pump with low-temperature heat storage. *Energy*, vol. 234, 121276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121276>
- [6] Kowalski, P., & Szalanski, P. (2019) Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland. *E3S Web Conf.*, vol. 116, 00039. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600039>
- [7] Mouzeviris, S., & Papakostas, K. (2020). Seasonal heat performances of air-to-water heat pumps in the Greek climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 410, 012043. <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012043>
- [8] Dongellini, M., Naldi, C., & Morini, G. (2015). Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 1072–1081. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.026>
- [9] Sun, X., Wang, Z., Li, X., Xu, Z., Yang, Q., & Yang, Y. (2021). Seasonal heating performance prediction of air-to-water heat pumps based on short-term dynamic monitoring. *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.130>
- [10] Pieper, H., Ommen, T., Elmegaard, B., & Markussen, W.B. (2019). Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating. *Energy*, vol. 176, pp. 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.165>
- [11] EN 14825: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/9fcc3835-2b65-478e-920e-3f3bacb6d2c5/en-14825-2022?srsId=AfmBOoCcXSU41E8JPj7vEtjyK-edvhcvXVGeNg_NGV7ebKkLRednJCg
- [12] EN 14511: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/93a37503-c91b-49dc-ad23-82ec9715acf1/en-14511-1-2022?srsId=AfmBOoqrSY8YxW_dHO7ifcsWK7BW748oVpXGzfQJa21PMV6pHrQF52vw
- [13] O’Hegarty, R., Kinnane, O., Lennon, D., & Colclough, S. (2022). Air-to-water heat pumps: Review and analysis of the performance gap between in-use and product rated performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111887>
- [14] EN 16147: Heat pumps with electrically driven compressors – Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/94e7aca8-ef04-4c14-b33f-815ae9d86e04/en-16147-2017?srsId=AfmBOoq0R71O9EMTxMhARuxSfONAYlHx5jcpPPWUYEkvXpPVYjoTicVV>

© Менжинський О. Ю., Соломаха А. С.
 Дата надходження статті до редакції: 02.06.2025
 Дата затвердження статті до друку: 15.06.2025