

УДК 621.643.053

В.О. ДЕРІЙ, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ORCID: 0000-0002-5689-4897

І.С. СОКОЛОВСЬКА, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-1959-9837

О.І. ТЕСЛЕНКО, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3772-5991

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КРАЇН СВІТУ ТА УКРАЇНИ

Розглянуто тенденції використання теплових насосів у системах централізованого теплопостачання країн Європи та їх перспективи в Україні. Встановлено, що з метою зменшення споживання викопного палива для цілей теплопостачання, у багатьох країнах світу створені спеціальні програми щодо стимулювання масового впровадження теплових насосів. Згідно цих програм у разі впровадження теплових насосів безпосередньо чи опосередковано надається державна фінансова підтримка. Показано, що загальна встановлена потужність теплових насосів в Україні має тенденцію до суттєвого зростання і в 2050 р. може досягнути 6,3 ГВт з прогнозованим річним виробітком 61,97 ПДж (14,8 млн Гкал) теплової енергії.

К л ю ч о в і с л о в а: системи централізованого теплопостачання, тепла енергія, тепловий насос, електричний котел, структура генерації, електричне навантаження.

Ця стаття є продовженням публікації [1] результатів дослідження щодо розвитку систем централізованого теплопостачання (СЦТ) України. Її метою є визначення тенденцій використання теплових насосів (ТН) у СЦТ країн світу та їх перспектив в Україні.

На сьогодні використання ТН у різних країнах світу для теплозабезпечення населення стало розповсюдженою практикою. Впровадженню ТН технологій сприяють світові тенденції декарбонізації розвитку сучасного суспільства та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, а також чуттєві планетарні зміни клімату. Загальний обсяг світового ринку ТН у 2018 р. оцінено у \$ 55,2 млрд, який, за прогнозами, до 2026 р. досягне \$ 99,6 млрд [2]. Експерти Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) (International Energy Agency, IEA) у 2011 р. розробили «дорожню карту» технологій «Енергоефективність будівель – обігрів та охолодження», яка передбачає зниження світового енергоспоживання на обігрів та охолодження до 2050 р. вдвічі порівняно з сьогодишнім рівнем. За цією «дорожньою картою» застосування ТН для житла здатне заощаджувати до 63% енергії [3], а за більш пізнішими дослідженнями МЕА (2020 р.) – до 90% [4].

Світовий ринок ТН усіх типів швидко зростає. Наприклад, у США частка продажів ТН для нових будівель перевищує 40% для односімейних житлових будинків і становить близько 50% для нових багатоквартирних будинків [4]; у 2020 р. у 21 країні Європи було встановлено 14,84 млн ТН, що на 6% (1,6 млн) більше, ніж у 2019 р., найбільше (48%) – у Франції (394 тис.), Італії (233 тис.) та Німеччині (140 тис.), а всього 87% річних продажів у Європі припадає на 10 країн, включаючи Іспанію, Швецію, Фінляндію, Норвегію, Данію, Польщу та Нідерланди [5]. Азіатсько-Тихоокеанський регіон є найбільшим регіональним ринком на загальносвітовому ринку ТН, де Японія, Китай та Індія є основними країнами, що приносять дохід у житловому, комерційному та промисловому секторах [2].

У різних регіонах застосовуються різні типи ТН відповідно до місцевих умов: ТН «повітря-повітря» найбільше поширені у США (зростання продажів з 2,3 млн од. у 2015 р. до 3,1 млн од. у 2019 р.), Японії, Європі; ТН «повітря-вода» – у Китаї (у 2017 р. продано 1,3 млн од.), Японії (у 2018 р. продано 480 тис. од.), Європі (майже 50% порівняно з іншими типами, у 2018 р. продано 155 тис. од.), США (у 2018 р. продано 95 тис. од.), Південній Кореї; ТН «вода-вода» найбільш поширені у Європі; ТН, що використовують теплоту ґрунту, найменше поширені у всьому світі, річний

© В.О. ДЕРІЙ, І.С. СОКОЛОВСЬКА, О.І. ТЕСЛЕНКО, 2021

обсяг продажів становить близько 400 тис. У Японії, Кореї, Європі та США реверсивні ТН зазвичай використовуються як для обігріву, так і для охолодження [3, 4, 6, 7].

У США ТН часто поєднуються із застосуванням сонячної енергії для обігріву помешкань, підігрівання води для побутових потреб і для басейнів, що істотно підвищує ефективність системи теплопостачання, а використання фотоелектричних панелей та будинкових електроакумуляторів дає змогу автономно забезпечити ТН електроенергією [3].

Сьогодні перше місце з впровадження ТН у Європі займає Швеція, де ТН застосовуються з початку 80-х років, а сьогодні використовуються великі установки одиничною тепловою потужністю більше 30 МВт, джерелом теплоти для яких є морська вода, очищені стічні води, скидна вода промислових підприємств. Найбільші теплонасосні установки (ТНУ) розташовані в містах Стокгольм (320 МВт), Мальме (40 МВт), Упсала (39 МВт), Еребру (42 МВт). Кількість теплоти, що виробляється ТНУ в Швеції, досягає близько 50%. Треба зазначити, що у цій країні широко використовуються СЦТ [3, 7, 8].

У інших країнах Європи також використовуються ТН у СЦТ, наприклад, у Швейцарії (найбільша в м. Лозанна, 7 МВт) [7]; у Польщі у 2017 р. порівняно з 2016 р. використання всіх видів ТН для СЦТ (і часто охолодження) збільшилося на 30%, зокрема використання ТН «повітря-вода» збільшилось приблизно на 55%, ТН «соляний розчин-вода», що використовують теплоту ґрунту, – приблизно на 5% [9].

Виконаний європейський проект «Heat Roadmap Europe» щодо використання ТН у СЦТ показав, що в майбутньому до СЦТ може надходити до 25% енергії від ТН, забезпечуючи загальну декарбонізацію енергосистеми. СЦТ 4-го покоління характеризуються інтеграцією теплових та електричних систем з низькими температурами подаваної та зворотної води. Для збільшення використання відновлюваних джерел енергії та поступової відмови від викопного палива, комбіновані теплоелектроцентралі, великі ТН та системи накопичення теплової енергії працюватимуть разом у взаємодії. СЦТ 4-го покоління також взаємодіятимуть з централізованими системами охолодження. Переваги інтеграції потужних ТН у майбутні «розумні» енергосистеми, СЦТ та системи охолодження: 1) ТН у поєднанні з системами накопичення енергії дають можливість майбутнім СЦТ збалансувати електромережу з огляду на нерівномірність вироблення електроенергії з відновлюваних джерел енергії та допомогти уникнути високих витрат на розширення електричних ме-

реж; 2) ТН дозволяють використовувати надлишкову теплоту низьких температур як від промисловості, так і від виробництва електроенергії, а також відновлювані джерела теплоти, і зменшити втрати в електромережі; 3) ТН збільшують гнучкість та ефективність СЦТ, використовуючи кілька джерел теплоти, що забезпечує більшу гнучкість енергосистеми в цілому, враховуючи швидке введення в експлуатацію ТН та низькі пускові витрати, а також нестабільність ринку електроенергії та можливості використання теплової мережі та накопичувачів як теплових акумуляторів [10].

Розвитку ринку ТН сприяє політика, спрямована на енергозбереження та охорону довкілля [6]. Питання законодавчого та нормативного регулювання впровадження ТН в ЄС та в Україні докладно розглянуто в публікації [11].

Як показує світовий досвід, впровадження ТН може стимулюватися з боку держави різними способами [8, 12]. Розглянемо їх докладно на наступних прикладах.

1. Прийняття законів, в яких джерело енергії, використовуване тепловими насосами, можна розглядати як відновлювану теплоту, внаслідок чого теплові насоси підпадають під дію інших стимулів, таких як податкові знижки.

У законах ряду країн визначено обов'язковість використання низькопотенційної теплоти від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), у т.ч. встановлення ТН у разі нового будівництва, зокрема у США, що призвело до того, що за рік в США продається понад 1 млн ТН, а виробниками є більше 50 фірм [7, 8]; У Швеції – у багатоповерхових будівлях для автономної системи кондиціонування, опалення і нагрівання води, найбільше у поєднанні з системою «тепла підлога» для максимально ефективного використання енергії, отриманої за допомогою ТН [8, 13]; у Німеччині з 01.01.2016 р. – для обігрівання приміщень і гарячого водопостачання повністю заборонені котли, що працюють на рідкому паливі, що призвело до збільшення продажів ТН на 30%. У Данії з 2013 р. заборонені установки, що спалюють викопне паливо [14].

У Швеції у разі реконструкції та модернізації будівель надається державна підтримка при використанні ВДЕ та схема скорочення податків, зокрема щодо ТН сума доплати залежить від вартості кожного виду робіт. У великих містах Китаю застосування ТН стимулюється будівництвом «зелених» енергоефективних будівель [3].

У Німеччині застосування ТН значно зросло з 2010 р., коли зрівнялась вартість електроенергії з мережі та отриманої в домогосподарстві за допомогою ВДЕ, тобто було досягнуто «мережевий паритет» [3].

У Великій Британії в 2018 р. розроблено Положення про схему стимулювання використання теплоти з ВДЕ (зокрема за допомогою встановлених у побутових приміщеннях ТН, що використовують теплоту ґрунту), згідно з яким власники установок, які виробляють теплоту з визначених ВДЕ та відповідають визначеним критеріям, можуть отримувати платежі за встановленими гарантованими тарифами за теплоту, яка використовується для прийнятних цілей, передбачено періодичні виплати підтримки. Щорічно має бути розраховано та опубліковано таблицю тарифів, скориговану відповідно до індексу споживчих цін [15].

2. Прийняття державних програм, які охоплюють теплові насоси та сприяють зменшенню витрат на установку та обладнання.

У багатьох країнах прийнято державні програми, які включають стимулювання впровадження ТН, наприклад, у Китаї субсидії в рамках «Плану дій щодо запобігання та контролю забруднення повітря», а в Японії в рамках «Плану енергозбереження» зменшення попередніх витрат на установку та обладнання. Ці програми показали позитивний результат: в Європі за останні роки темпи зростання продажів зросли у десятки разів. І навпаки, в Китаї згортання державної програми «Від вугілля до електрики», в рамках якої застосовувались субсидії для ТН «повітря-вода» на заміну котлів, що працюють на вугіллі, призвело до зниження продажів ТН «повітря-вода» на 30% [4, 6, 8, 12].

За урядовою програмою Німеччини (нім. - Marktanzreizprogramm, MAP) на встановлення ТН видаються гранти-субсидії, зокрема для ТН, що використовують теплоту ґрунту: до 10 кВт – 2,4 тис. євро; 10–20 кВт – 2,4 тис. євро плюс 120 євро/1 кВт; 20–100 кВт – 2,4 тис. євро плюс 100 євро/1 кВт [16]. На установку ТН у Франції з 2005 р. надаються податкові кредити, а в Бельгії – субсидії в розмірі до 75% від вартості ТН [3]. У Швеції за урядовою програмою надається державна дотація на встановлення ТН [8]. В Австрії, де ТН застосовуються з 1993 р., в основному, для обігріву домів та гарячого водопостачання, енергетична політика австрійського уряду та уряду провінцій щодо заохочення використання ТН призвела до різкого зростання продажу ТН різних типів в останні роки та, відповідно, до значного скорочення викидів CO₂ [17]. В Японії виконуються урядові програми, згідно з якими надаються субсидії для встановлення ТН: від \$450 для побутового використання і \$1500–2300 – для комерційних цілей [3]. У країнах Азіатсько-Тихоокеанського регіону впроваджуються державні програми з популяризації енергоефективного обладнання, які, зокрема, заохочують купівлю ТН «повітря-вода» [6].

У США та Китаї існують спеціальні програми щодо ТН, які використовують теплоту ґрунту, згідно з якими 30% початкових інвестиційних витрат компенсує держава. Для сприяння досягненню цілі використання таких ТН у 700 млн. м² Китай запропонував додаткові субсидії (від 35 до 70 юанів/м²) для деяких районів, таких як Цзілінь, Чунцин та Нанкін [4].

3. Встановлення вимог до технологічних характеристик, наприклад, енергоефективність більше, ніж коефіцієнт корисної дії 1 для всіх опалювальних технологій до 2030 р. (Канада), мінімальний сезонний коефіцієнт продуктивності (SPF) дорівнює 3,8 (ЄС) [12].

За урядовою програмою Німеччини MAP сезонний коефіцієнт продуктивності SPF ґрунтових ТН повинен становити не менше 3,8, мінімальна відповідність ТН «соляний розчин-вода» приписами Ecolabel (ENRA Quality Label V 1,4) з коефіцієнтом SPF = 4,3 [16].

У США Федеральна програма енергоменеджменту (Federal Energy Management Program, FEMP) містить таблиці вимог до мінімальної ефективності та продуктивності для ряду категорій устаткування щодо обігріву та охолодження, зокрема ТН, що використовують теплоту повітря (для будинку), та геотермальних ТН (для будинку) [18]. Також Департамент енергетики США у 2019 р. оприлюднив інформацію стосовно стандартів мінімальної енергоефективності для ТН, які використовуються для кондиціонування повітря [19]. Федеральні покупці можуть використовувати ці таблиці, як довідковий матеріал, і визначати належні вимоги до закупівель [18]. У результаті двох підвищень мінімальних показників енергоефективності у 2006 та 2015 рр. у США середній коефіцієнт корисної дії ТН зріс на 13 та 8%, відповідно [12].

У Канаді на федеральному рівні чинні стандарти енергоефективності для ТН різних типів, у той самий час у провінціях Британська Колумбія, Манітоба, Онтаріо, Квебек, Нью-Брансвік та Нова Шотландія існують свої власні норми енергоефективності для такого обладнання [20]. У Китаї введені нові стандарти енергоефективності сприяли розвитку ринку побутових ТН «повітря-вода», який у 2015 р. оцінювався в 10 млрд юанів (\$ 1,6 млрд) [3].

4. Маркування енергетичних характеристик теплового насоса, що дає можливість порівнювати енергоефективність різних видів обладнання.

Директива 2009/125/ЄС (Energy related Products, ErP) від 21 жовтня 2009 р. [21] щодо встановлення рамок для визначення вимог з еко-дизайну, що застосовується до будь-яких продуктів, які впливають на енергоспоживання, є

правовою основою, відповідно до якої виробники зобов'язані знижувати споживання енергії протягом терміну експлуатації їх продукції та скорочувати негативні впливи на довкілля. Ця директива передбачає застосування на етапі проектування мінімальних вимог до енергетичної та екологічної ефективності на одиницю продукції, що використовує енергію (у т.ч. ТН) або пов'язана з використанням енергії (наприклад, вікна), а її виконання є обов'язковим для виробників та імпортерів. Визначено сезонний показник енергоефективності – новий спосіб оцінювання виробів, які обігрівають і охолоджують приміщення, на основі їхньої енергоефективності протягом усього року.

Застосування Директиви 2009/125/ЕС до різних видів обладнання, зокрема з використанням ТН, визначено у відповідних Регламентах: Регламент 206/2012/EU від 6 березня 2012 р. [22] щодо обладнання для повітряного нагрівання та охолодження та побутових вентиляторів; Регламент 813/2013/EU від 2 серпня 2013 р. [23] щодо обігрівачів приміщень та комбінованих обігрівачів до 400 кВт включно; Регламент 814/2013/EU від 2 серпня 2013 р. [24] щодо водонагрівачів до 400 кВт включно та баків з гарячою водою (баків-акумуляторів) до 2000 л включно; Регламент 2016/2281/EU від 30 листопада 2016 р. [25] щодо обладнання для повітряного опалення потужністю не більше 1 МВт та обладнання для охолодження, охолоджувачів високотемпературних процесів та фанкойлів потужністю не більше 2 МВт.

Директива 2009/125/ЕС тісно пов'язана з Регламентом Європарламенту та Ради 2017/1369/EU від 4 липня 2017 р. [26], який замінив Директиву 2010/30/ЄС, щодо встановлення рамок енергетичного маркування, яке має надавати покупцям інформацію про енергетичні показники обладнання.

Делеговані Регламенти Комісії (ЄС) № 811/2013 [27] та № 812/2013 [28] від 18 лютого 2013 р. визначають правила енергетичного маркування різних видів обладнання, зокрема такого, де застосовуються ТН: Регламент 811/2013 стосується ТН приладів для обігріву, комбінованих ТН приладів для обігріву та низькотемпературних ТН, а Регламент 812/2013 – водонагрівачів із вбудованим ТН.

Регламент 811/2013 запроваджує нову шкалу маркування від А+++ до G для обладнання потужністю до 70 кВт (когенераційні опалювальні прилади – до 50 кВт). Класи сезонної енергоефективності від А до G охоплюють різні типи звичайних опалювальних котлів, які не поєднуються з когенерацією та технологією використання ВДЕ, класи А+ та А+++ повинні сприяти використанню когенерації та ВДЕ. Нова шкала вводилась поетапно з 26 вересня 2015 р. до 26 вересня 2019 р.

Окремо треба зазначити, що для ТН дуже важливими є вимоги щодо шуму, які на європейському рівні вирішуються в рамках вимог щодо екодизайну та енергетичного маркування, зокрема Регламентів 206/2012, 813/2013, 811/2013 та відповідних європейських стандартів щодо рівня звукового тиску ТН [22, 23, 27].

5. Підвищення екологічних вимог, що сприяє впровадженню теплових насосів як обладнання без шкідливих викидів та викидів парникових газів [6, 8, 12].

У Північній Європі велику увагу приділяють проблемам екології, зокрема у Данії, Фінляндії, Норвегії та Швеції державою в рамках політики, спрямованої на зменшення парникових викидів, субсидується покупка обладнання, що використовують ВДЕ, до яких відносяться ТН. У результаті продажі ТН «повітря-вода» зросли за 2018 р. на 10% [6].

У США ефективною є система штрафів (за викиди CO₂) і заохочень за використання низькопотенційної теплоти для тепlopостачання [7]. В Австралії, як результат прийняття суворих екологічних законів, ТН «повітря-вода» все більше стають альтернативою електричним водонагрівачам [6].

В Японії в результаті виконання урядової програми з вивчення наслідків застосування ТН не було виявлено жодного негативного фактору впливу на довкілля та безпеку людини, що сприяло масовому впровадженню ТН у систему тепlopостачання. Для забезпечення максимальної ефективності в цьому секторі економіки широко використовуються переваги приватно-державного партнерства. У середині 80-х років минулого століття був створений фонд «Теплові насоси», який показав результативність своєї роботи. Після катастрофи на АЕС «Фукусіма-1» ще більше розвиваються програми, які зменшують залежність від атомної енергетики і газу та сприяють впровадженню енергозберігаючих технологій [3, 29].

Треба зазначити, що поєднання зазначених вище способів стимулювання впровадження ТН дає найкращий результат.

Використання геотермальної енергії на невеликих глибинах.

На 2015 р. у світі було встановлено понад 4,2 млн систем використання геотермальної енергії на невеликих глибинах (ГЕНГ), до складу яких входять ТН загальною потужністю 50 258 МВт. Експлуатація систем з використанням ГЕНГ має мультидисциплінарний характер (геологічні енергетичні ресурси, обігрівальні/охолоджувальні споруди, екологічні проблеми). Правова база регулювання енергетичних систем, що використовують ГЕНГ, у країнах світу ще знаходиться на стадії розробки, зокрема ще не існує загальноприйнятих

взаємопов'язаних визначень: так, у більшості країн невеликою вважається глибина до 400 м, в Іспанії – до 250 м. Найбільша увага правовому регулюванню приділяється в європейських країнах. Деякі загальні підходи передбачають встановлення мінімальної відстані між 2,5 (Австрія) та 10 м (Фінляндія та Швеція) від закритих геотермальних систем до меж власності. Також немає єдиного підходу щодо визначення порогових значень температур скидних вод у теплонасосних системах з відкритим контуром, що використовують теплоту підземних вод. Ці значення знаходяться в діапазоні: у разі охолодження теплонапосною системою температура скидних вод не повинна перевищувати 15–25 °С, у разі нагрівання – 2–5 °С. Регулювання використання ГЕНГ відбувається як на національному, так і на регіональному та місцевому рівнях, наприклад, в Іспанії чинними є такі правові документи: 9 національних, з яких 2 рекомендованих і 2 обов'язкові, 3 регіональних (обов'язкові), 2 місцеві (обов'язкові), зокрема правові компетенції щодо видобутку, оцінки впливу на довкілля та води перенесені з національного рівня на регіональний. У табл. 1 наведено перелік законодавчих документів, які регулюють використання ГЕНГ у деяких країнах ЄС [30, 31].

В Україні розвитку та впровадженню ТН технологій також приділяється значна увага, хоча темпи їх впровадження та використання відбуваються значно повільніше, ніж у розвинутих країнах світу. Зокрема, в 2009 р. урядом України був схвалений проект розпорядження «Щодо розробки програми впровадження теплових насосів», який містив перелік першочергових проектів з впровадження у 2009–2010 рр. більше 250 ТН установок у різних

регіонах України для автономного теплопостачання бюджетних установ та централізованого теплопостачання понад 1 млн населення з очікуваним зменшенням викидів парникових газів на 700 тис. т $\text{CO}_{2\text{екв}}$ на рік та економією природного газу на 595,64 млн м^3 на рік [32]. Подальшого розвитку цієї програми не відбулось.

У 2014 р. був затверджений Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р., в якому наведено оцінку загального внеску (кінцевий обсяг енергоспоживання), очікуваного за кожним джерелом відновлюваної енергії, зокрема, для ТН, для досягнення обов'язкових індикативних цілей на 2020 р. та індикативної проміжної траєкторії досягнення частки енергії з ВДЕ у системах опалення та охолодження на 2014–2020 рр., як це показано в табл. 2.

У 2019 р. фахівцями Інституту технічної теплофізики НАН України здійснено оцінку теплової потужності та обсягів виробництва відновлюваної енергії ТН в Україні станом 01.01.2019 р. [34] з використанням Методики обчислення енергії, виробленої тепловими насосами з ВДЕ, затвердженої наказом Міністерства регіонального розвитку України від 12.03.2018 №52 [35].

ТН установки, згідно цій методики, поділено на дві відмінні групи:

Реверсивні кондиціонери (РК), первинною функцією яких є робота в режимі охолодження повітря, а вторинною – робота у режимі нагрівання повітря;

ТН, первинною функцією яких є робота у режимі нагрівання повітря або проміжних теплоносіїв (вода, розсіл) системи обігріву та/або гарячого водопостачання, а вторинною – охолодження

Таблиця 1. Перелік законодавчих документів, що стосуються використання ГЕНГ у деяких країнах ЄС [31]

Документ	Країни
Закон про воду	SI, SK, PL, DE, CZ, AT
Закон про видобуток корисних копалин	SI, PL, DE, AT (якщо глибина > 300 м, то не може бути застосовано для ГЕНГ)
Закон про будівництво	SI, PL, CZ
Закон про геологію	SK, DE, CZ
Закон про охорону довкілля	PL, SI
Закон про підтримку відновлюваних ресурсів	SK, PL
Закон про просторове планування	PL
Постанова про водоохоронні зони (місцевий рівень)	SI, SK, DE, CZ, AT
Постанова про зони затоплення (місцевий рівень)	SK, CZ
Місцеві правила землекористування	PL
Скорочення: AT – Австрія, CZ – Чеська Республіка, DE – Німеччина, PL – Польща, SK – Словаччина, SI – Словенія	

Таблиця 2. Оцінка загального внеску (кінцевий обсяг енергоспоживання)¹, очікуваного від застосування теплових насосів за видами ВДЕ для досягнення індикативних цілей на 2020 р., тис. т нафтового еквіваленту [33]

Виробництво відновлювальної енергії від теплових насосів за видами джерел / рік	2009	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Відновлювана енергія від теплових насосів, у тому числі:	40	130	200	280	350	420	500	600
аеротермальна	27	90	140	195	245	290	360	420
геотермальна	9	26	39	55	70	85	90	120
гідротермальна	4	14	21	30	35	45	50	60

повітря або теплоносіїв системи кондиціонування у активному або пасивному режимах.

Стаття 10 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» [36] містить загальні умови віднесення ТН до обладнання відновлюваної енергетики: «Отриману за допомогою теплових насосів аеротермальну, геотермальну та гідротермальну енергію слід вважати отриманою з відновлюваних джерел за умови, що кінцевий вихід енергії значно перевищує споживання первинної енергії, яка необхідна для приводу теплових насосів». Згідно Директиви 2009/28/ЄС [37], критерієм віднесення парокомпресійного ТН з приводом від електричного двигуна, який споживає електроенергію з енергетичної системи, до установок відновлюваної енергетики встановлюється мінімально допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії зазначених теплових насосів. (SPF_0), який визначається за виразом

$$SPF_0 = \frac{1,15}{\eta}, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт корисної дії енергетичної системи з виробництва електричної енергії, що означає співвідношення між загальним сукупним виробництвом електроенергії та первинним споживачем енергії для виробництва електроенергії та розраховується за даними енергетичного балансу 28 країн-членів ЄС за 2010 р., що базується на даних Євростату (додаток VII до Директиви 2009/28/ЄС).

Результати оцінки накопиченої потужності всіх теплових насосів, включаючи РК, за 2001–2017 рр. та ефективної потужності «зелених» ТН, які вдовольняють вимоги Директиви 2009/28/ЄС та ст.10 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» щодо енергетичної ефективності, показали, що станом на початок 2018 р. загальна потужність всіх ТН (включно з РК) оцінюється у 7382 МВт, а потужність «зелених» теплових

насосів – у 2046 МВт. За період дослідження максимум кумулятивної загальної потужності ТН (8134 МВт), як і ефективної потужності (2277 МВт), був досягнутий у 2015 р. Значна різниця між сумарною та ефективною потужністю пояснюється авторами тим, що домінуючу частину парку теплонасосних установок становлять реверсивні кондиціонери, більшість з яких, за виключенням деяких сучасних інверторних установок, не відповідає вимогам Директиви 2009/28/ЄС щодо сезонної енергетичної ефективності. Максимум річного виробництва теплоти ТН (2015 р.) оцінюється у 3223 ГВт·год, обсяг виробництва у 2017 р. – у 2884 ГВт·год. Зазначені обсяги відносяться до вилученої енергії з відновлюваних джерел, які є нижчими за фактичне виробництво корисної енергії на величину витрат електричної енергії на привод ТН. Ця величина оцінюється у 2017 р. у 1540 ГВт·год при середньому значенні сезонного коефіцієнту продуктивності 2,87 [34].

У структурі виробництва теплоти з ВДЕ у 2017 р. за типами ТН установок провідну роль відіграють (у порядку зменшення) реверсивні кондиціонери «повітря-повітря» – 1362 ГВт·год, ТН «грунт-вода» – 898 ГВт·год, ТН «вода-вода» – 540 ГВт·год, ТН «повітря-вода» – 61 ГВт·год, ТН «повітря-повітря» – 22 ГВт·год [34].

Станом на 2016 р. частка виробництва теплоти «зеленими» ТН з ВДЕ у загальному обсязі постачання кінцевої енергії в Україні оцінюється у 0,5%, а у загальному обсязі постачання енергії на потреби побутового сектору (17,586 млн т н.е.) – 1,4%, або 2,7% від обсягу відпуску теплової енергії від централізованих джерел теплопостачання [34].

Автори наведених результатів дослідження [34] наголошують, що одержані оцінки обсягів виробництва теплової енергії з ВДЕ засновані на рекомендованих (типових) значеннях експлуатаційних характеристик ТН установок і відображу-

¹ Розраховано як для прямого використання енергоресурсів, так і через систему центрального опалення (як визначено у Статті 5(4) Директиви 2009/28/ЄС).

ють скоріше потенційні, ніж фактичні значення, одержання яких потребує проведення значного обсягу додаткових натурних досліджень.

В Україні відомі поодинокі випадки успішного застосування промислових ТН, наприклад, ТН установка теплопродуктивністю 1,5 МВт, що встановлена на підприємстві «Краматорськміжрайтепломережа», ТН установка в пансіонаті «Дружба» (м. Ялта) теплопродуктивністю 2,8 МВт, ТН установка в банку «Ажіо» теплопродуктивністю 250 кВт, ТН установка на насосній станції «Баварія» (м. Харків) теплопродуктивністю 200 кВт, ТН установка теплопродуктивністю 125 кВт у теплицях м. Донецька, показали техніко-економічну доцільність їх використання [38]. Більше розповсюдження отримали напівпромислові ТН переважно тепловою потужністю від 25 до 50 кВт для гарячого водопостачання та часткового обігріву помешкань у комбінованих системах автономного теплопостачання у готельних та офісних будівлях, складських приміщеннях, лікарнях та оздоровчих установах, закладах освіти, торгівлі та громадського харчування тощо.

Розглянемо перспективи впровадження ТН в Україні. В [1, табл. 3] наведено сумарну кількість теплової енергії, виробленої ТН та електричними котлами. Для розподілу цієї енергії між ними використаємо інформацію, наведену в [39, С.62, табл. 18]. У цій таблиці наведено прогноз річного споживання електроенергії окремо ТН та електричними котлами всіх систем теплозабезпечення України. Знаючи споживання електроенергії ТН та електричними котлами (ЕК), визначимо кількість виробленої ними теплової енергії за формулою:

$$Q_t^{mn,ek} = k_t^{mn,ek} \cdot E_t^{mn,ek}, \quad (2)$$

де $Q_t^{mn,ek}$ – кількість виробленої теплової енергії ТН або ЕК в рік t ;

$k_t^{mn,ek}$ – коефіцієнт перетворення (0,98 для ЕК та 3,5 для ТН);

$E_t^{mn,ek}$ – кількість спожитої електроенергії ТН або ЕК в рік t .

Далі знайдемо вклад теплових насосів у загальну кількість виробленої теплової енергії ТН та ЕК за формулою:

$$K_t^{mn} = \frac{Q_t^{mn}}{Q_t^{mn} + Q_t^{ek}}, \quad (3)$$

де K_t^{mn} – відносний вклад ТН в загальну кількість виробленої теплової енергії ТН та ЕК у рік t .

Значення коефіцієнта K_t^{mn} наведено на діаграмі, (рис. 1).

Зробимо припущення, що коефіцієнт K_t^{mn} буде таким самим і для СЦТ. Далі, використовуючи дані щодо виробництва теплової енергії ТН та елек-

тричними котлами, які наведено в [1, табл. 3], визначимо їх виробництво окремо в кожному році. Результати розрахунків показано на рис. 2.

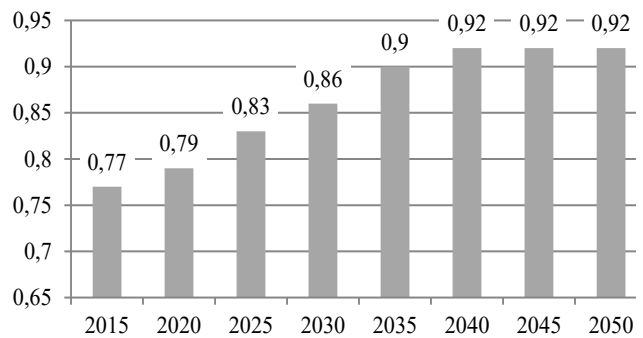


Рис. 1. Відносний вклад ТН у загальну кількість виробленої теплової енергії ТН та ЕК

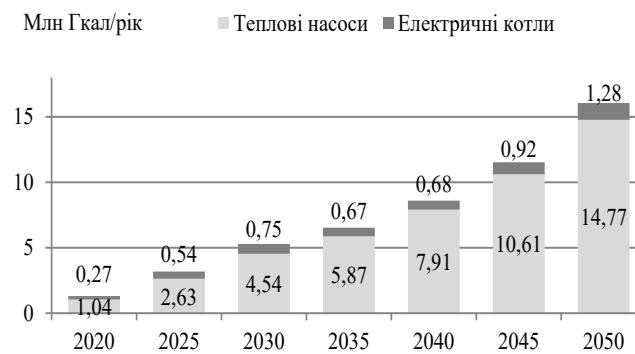


Рис. 2. Прогноз виробництва теплової енергії ТН та електричними котлами

Для верифікації отриманих результатів порівняємо їх з прогнозами виробництва теплової енергії ТН в 2030 р., які зроблені Міжнародним агентством з відновлювальних джерел енергії (IRENA) та Інститутом відновлювальних джерел енергії НАН України (ІВЕ НАН України) [40]. Згідно цих прогнозів в 2030 р. в Україні ТН вироблять 15 млн Гкал (ІВЕ НАН України) та 12 млн Гкал (IRENA). Відповідно до цього СЦТ вироблять 4,2 млн Гкал та 3,36 млн Гкал (як було показано раніше [1], вклад СЦТ в загальне теплопостачання становить близько 28%). Згідно зробленого нами прогнозу ТН в 2030 р. вироблять 4,54 млн Гкал теплової енергії. Як видно, результати співставні.

Використовуючи діаграму, показану на рис. 1, та вираз (4) визначимо споживання електроенергії E тепловими насосами та електричними котлами.

$$E = K \frac{Q_t^{mn,ek}}{k_t^{mn,ek}}, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт пропорційності – 1,163;

$Q_t^{mn,ek}$ – кількість виробленої теплової енергії в рік t ТН, електричним котлами;

$k_t^{mn,ek}$ – коефіцієнт перетворення ТН (3,5) та електричного котла (0,98).

Результати розрахунків показано в табл. 3.

Для визначення граничної потужності ТН та електричних котлів зробимо наступні припущення:

ТН будуть працювати в СЦТ на повну потужність протягом опалювального періоду з перервами під час піків електричного навантаження в енергосистемі (18 год на добу);

електричні котли будуть працювати тільки під час нічного провалу графіків електричних навантажень (8 год на добу).

Сумарну середню теплову потужність ТН та електричних котлів визначимо для опалювального періоду за формулою:

$$q_t^{mn,ek} = \frac{Q_t^{mn,ek}}{T_t^{mn,ek}}, \quad (5)$$

де $q_t^{mn,ek}$ – сумарна середня теплова потужність ТН або електричних котлів;

$T_t^{mn,ek}$ – кількість годин роботи ТН або електричних котлів, у рік t яка визначається за формулою:

$$T_t^{mn,ek} = N_t^{on} \cdot \tau, \quad (6)$$

де N_t^{on} – тривалість опалювального періоду у рік t діб;
 τ – кількість годин роботи ТН та електричних котлів за добу (18 та 8 год, відповідно).

Результати розрахунків показано в табл. 4.

Також було оцінено додаткові можливості ТН (та електричних котлів), які визначають їх роль в

СЦТ, а саме – електричне навантаження та холодопродуктивність за формулами (7) та (8) :

$$P_t^{mn,ek} = \frac{q_t^{mn,ek}}{k_t^{mn,ek}}, \quad (7)$$

де $P_t^{mn,ek}$ – електричне навантаження ТН або електричних котлів.

$$q_t^{xmn} = k_{np} \cdot q_t^{mn}, \quad (8)$$

де q_t^{xmn} – сумарна холодопродуктивність ТН у рік t ;

q_t^{mn} – сумарна теплова потужність ТН у рік t ;

k_{np} – коефіцієнт пропорційності (близько 1,5).

Результати розрахунків показано в табл. 5.

Як видно з табл. 5, ТН спільно з електричними котлами будуть створювати достатньо велике електричне навантаження на енергетичні системи, що можна використати для надання допоміжних послуг енергосистемам. Крім того, потенціал холодопродуктивності можна використати для централізованого охолодження в літній період, при цьому ТН можуть підігрівати воду.

Таким чином, роль ТН в СЦТ наступна:

генерація теплової енергії в опалювальний період;

централізоване постачання гарячої води та холодопостачання в літній період;

добове регулювання електричного навантаження енергосистем (під час нічного провалу графіків електричних навантажень разом із електричними котлами).

Таблиця 3. Прогноз споживання електричної енергії ТН та електрокотлами, млрд кВт·год

Теплогенератор/рік	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Теплові насоси	0,37	0,83	1,53	1,96	2,66	3,56	4,95
Електричні котли	0,33	0,61	0,90	0,81	0,82	1,09	1,52
Всього	0,70	1,44	2,43	2,77	3,48	4,65	6,47

Таблиця 4. Теплова потужність ТН та електрокотлів (ЕК)

Параметр/рік	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Тривалість опалювального періоду, діб	176	172	168	164	160	156	152
Середня теплова потужність ТН, МВт	382,6	989,6	1744,4	2311,9	3193,9	4395,0	6277,8
Середня теплова потужність ЕК, МВт	222,5	458,4	647,6	591,0	618,1	859,9	1228,3

Таблиця 5. Додаткові можливості ТН та електрокотлів

Параметр/рік	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Середнє електричне навантаження ТН, МВт	109,3	282,7	498,4	660,5	912,6	1255,7	1793,7
Середнє електричне навантаження ЕК, МВт	227,0	467,8	660,8	603,1	630,7	877,4	1253,3
Сумарне середньорічне електричне навантаження ТН та ЕК, МВт	336,3	750,5	1159,2	1263,6	1543,3	2133,1	3047,0
Потенціал холодопродуктивності ТН, МВт	255,1	659,7	1162,9	1541,2	2129,3	2930,0	4185,2

ВИСНОВКИ

Встановлено, що з метою зменшення споживання викопного палива для теплопостачання в багатьох країнах світу застосовуються різні способи стимулювання масового впровадження ТН технологій, зокрема: прийняття законів, в яких джерело енергії, використовуване ТН, можна розглядати як відновлювану теплоту, внаслідок чого ТН підпадають під дію інших стимулів, таких як податкові пільги; прийняття державних програм, які охоплюють ТН та сприяють зменшенню (компенсації) витрат на ТН обладнання та його монтаж; встановлення вимог до технологічних характеристик; маркування енергетичних характеристик ТН; підвищення екологічних вимог. Поєднання зазначених способів дає найкращий синергетичний результат. Державні програми стимулювання використання ТН передбачають безпосередню або опосередковану державну фінансову підтримку. Виробництво ТН в країнах ЄС регламентується відповідними Директивами та Рішеннями Європейської Комісії. В Україні активно проводиться робота з гармонізації цих документів, вдосконалення та адаптації українського законодавства до європейського.

У світі не існує єдиного підходу щодо регулювання впровадження та використання ТН. У кожній країні діють свої регуляторні акти з відповідними дозволами та обмеженнями. Але існують спільні обмеження використання ТН, а саме: за рівнем шуму, за мінімальним коефіцієнтом перетворення, за температурою скидних вод у ТН системах з відкритим контуром, територіальні обмеження щодо відстані між колектором ґрунтового ТН та іншою власністю. Для будівництва ТН систем необхідні певні дозволи відповідних відомств, як на державному, так і регіональному (місцевому) рівнях. У процесі експлуатації потужних ТН, які використовують теплоту водних середовищ, проводиться моніторинг їх продуктивності та витрат енергії низькопотенційного джерела теплоти.

Використання електроенергії в усіх галузях економіки світу буде розвиватися швидкими темпами. У 2050 р. електрифікація займе лідируючу позицію у виробництві теплової енергії СЦТ України, що призведе до масового використання ТН для обігріву та охолодження приміщень, а також для гарячого водопостачання. Загальна теплова потужність встановлених ТН протягом найближчих тридцяти років буде зростати (у середньому 200 МВт/рік) та в 2050 р. досягне 6,3 ГВт, що дозволить забезпечити річний виробіток 14,8 млн Гкал теплової енергії.

Визначено, що роль ТН в СЦТ буде такою: генерація теплової енергії в опалювальний період, централізоване постачання гарячої води та холодопостачання в літній період, добове регулювання електричного навантаження енергосистем.

1. Дерій В.О. Тенденції розвитку систем централізованого теплопостачання України. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 1(64). С. 52—59. <https://doi.org/10.15407/pge2021.01.052>

2. Heat Pump Market by Type (Air-to-Air, Water Source, and Geothermal) and Application (Residential, Industrial, and Commercial): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2019—2026. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/heat-pump-market> (дата звернення: 18.01.2021).

3. Михненко С. Тепловые насосы воздух-вода, применение в системах отопления разных стран. URL: <https://aw-therm.com.ua/energiya-iz-vozdruha/> (дата звернення: 18.01.2021).

4. Heat Pumps. More efforts needed. Tracking report. June 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (дата звернення: 18.01.2021).

5. European Heat Pump Association. Market Data. URL: <https://www.ehpa.org/market-data/> (дата звернення: 18.01.2021).

6. Мировой рынок тепловых насосов «воздух-вода». *Мир климата*. 2019. № 117. URL: https://mir-klimata.info/archive/2019_6/mir_news_117 (дата звернення: 18.01.2021).

7. Хакимуллин Б.Р., Багаутдинов И.З. Зарубежный опыт эксплуатации тепловых насосов. <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-ekspluatatsii-teplovyyh-nasosov/viewer> (дата звернення: 18.01.2021).

8. Застосування теплових насосів в світі. URL: <https://akvilonpro.ua/ua/ingenernie-proektu/teplovie-nasosi/primenenie-teplovyyh-nasosov-v-mire.html> (дата звернення: 20.01.2021).

9. Теплові насоси в Польщі. Динамічно зростаючий ринок. URL: <https://freenergy.com.ua/teplovi-nasosy-v-polshchi/> (дата звернення: 18.01.2021).

10. Celsius Initiative. Heat pumps in district heating systems. URL: <https://celsiuscity.eu/heat-pumps-in-district-heating-systems/> (дата звернення: 18.01.2021).

11. Соколовська І.С. Удосконалення нормативного забезпечення щодо теплових насосів як механізм імплементації європейських директив. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. Вип. 2(53). С. 45—50. <https://doi.org/10.15407/pge2018.02.045>

12. Tracking Buildings. Heat pumps. URL: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings/heat-pumps> (дата звернення: 20.11.2020).

13. Теплові насоси в Швеції. Шведська історія успіху. URL: <https://freenergy.com.ua/teplovi-nasosy-v-shvecii/> (дата звернення: 18.01.2021).

14. Теплові насоси в Німеччині. Як німці, на законодавчому рівні, вплинули на ринок теплових насосів. URL: <https://freenergy.com.ua/teplovi-nasosi-v-nimechchyni/> (дата звернення: 20.01.2021).

15. The Renewable Heat Incentive Scheme Regulations 2018. URL: https://www.legislation.gov.uk/ukdsi/2018/9780111166734/pdfs/ukdsi_9780111166734_en.pdf (дата звернення: 20.01.2021).

16. Аналітичний огляд використання теплових насосів як відновлювальних джерел енергії. 25 с. URL: <http://inmad.vntu.edu.ua/portal/static/7D8D3D7C-D80A-4600-AE38-E42986C37E36.pdf> (дата звернення: 20.01.2021).

17. Acoustic signatures of heat pumps. IEA HPT. Annex 51. Regulations - Countries overview. 104 p. URL: <https://>

heatpumpingtechnologies.org/annex51/wp-content/uploads/sites/59/2019/04/iea-hpt-annex51-12-regulations-v01.pdf (дата звернення: 20.01.2021).

18. Federal Energy Management Program. Incorporate Minimum Efficiency Requirements for Heating and Cooling Products into Federal Acquisition Documents. URL: <https://www.energy.gov/eere/femp/incorporate-minimum-efficiency-requirements-heating-and-cooling-products-federal> (дата звернення: 20.01.2021).

19. DOE Efficiency Standards: What You Need to Know. URL: <https://www.trane.com/residential/en/resources/doe-efficiency-standards-need-know/> (дата звернення: 20.01.2021).

20. Natural Resources Canada. Energy efficiency regulations by province. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/energy-efficiency-regulations/energy-efficiency-regulations-province/20986> (дата звернення: 20.01.2021).

21. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. OJ L 285, 31.10.2009, P. 10–35. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2009/125/oj> (дата звернення: 20.01.2021).

22. COMMISSION REGULATION (EU) No 206/2012 of 6 March 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for air conditioners and comfort fans (OJ L 72, 10.3.2012, P. 7–27).

23. COMMISSION REGULATION (EU) No 813/2013 of 2 August 2013 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for space heaters and combination heaters. O.J.EC L 239/136 of 6.9.2013. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2013/813/oj> (дата звернення: 20.01.2021).

24. COMMISSION REGULATION (EU) No 814/2013 of 2 August 2013 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for water heaters and hot water storage tanks. O.J.EC L 239/162 of 6.9.2013. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2013/814/2017-01-09> (дата звернення: 20.01.2021).

25. COMMISSION REGULATION (EU) 2016/2281 of 30 November 2016 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regards to ecodesign requirements for air heating products, cooling products, high temperature process chillers and fan coil units (OJ L 346, 20.12.2016, P. 1).

26. Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 setting a framework for energy labelling and repealing Directive 2010/30/EU. OJ L 198, 28.7.2017, P. 1–23. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/1369/oj> (дата звернення: 20.01.2021).

27. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 811/2013 of 18 February 2013 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labelling of space heaters, combination heaters, packages of space heater, temperature control and solar device and packages of combination heater, temperature control and solar device. O.J.EC L 239/83 of 6.9.2013. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_del/2013/811/2017-03-07 (дата звернення: 20.01.2021).

28. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 812/2013 of 18 February 2013 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labelling of water heaters, hot water storage tanks and packages of water heater and solar device. O.J.EC L 239/83 of 6.9.2013. URL: http://data.europa.eu/eli/reg_del/2013/812/2018-04-26 (дата звернення: 20.01.2021).

29. Каранкевич В.В., Таранчук А.С. Опыт применения тепловых насосов. *Актуальные проблемы энергетики*. ЧТК-74. С. 41–43. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/49756/OPYT_PRIMENENIYA_TEPLOVYH_NASOSOV.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 20.01.2021).

30. García Gil A, Mejías Moreno M. Current Legal Framework on Shallow Geothermal Energy Use in Spain. *J Sustain Res*. 2020;2(1):e200005. <https://doi.org/10.20900/jsr20200005> (дата звернення: 20.01.2021).

31. Summary of national legal requirements, current policies and regulations of shallow geothermal use. URL: <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/GeoPLASMA-CE/CE177-GeoPLASMA-CE-D.T2.4.1-Summary-of-national-legal-requir.pdf> (дата звернення: 21.01.2021)..

32. Теплові насоси – гарант стабільного теплопостачання. *Енергосбереження*. 2009. № 6. С. 2.

33. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 1 жовтня 2014 р. № 902-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80#Text> (дата звернення: 14.07.2021).

34. Басок Б. І., Дубовський С.В. Укрупнена оцінка теплової потужності та обсягів виробництва відновлюваної енергії тепловими насосами в Україні Теплові насоси в Україні. *Інформаційний бюлетень*. 2019. № 1. С. 2–6.

35. Про затвердження Методики обчислення частки енергії, виробленої тепловими насосами з відновлюваних джерел: Наказ Міністерства регіонального розвитку України від 12.03.2018 № 52. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-18#Text> (дата звернення: 14.07.2021).

36. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text> (дата звернення: 14.07.2021).

37. Директива Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС від 23 квітня 2009 року про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел тощо. *Офіційний вісник Європейського Союзу* 5.6.2009. L140/16– L140/62. URL: https://saee.gov.ua/documents/dyrektyva_2009_28.pdf (дата звернення: 14.07.2021).

38. Кудря С.О., Будько В.І. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: курс лекцій. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.

39. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). URL: <http://www.ied.org.ua/files/book2.pdf> (дата звернення: 13.07.2021).

40. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukraini.pdf> (дата звернення: 13.07.2021).

Надійшла до редколегії: 19.07.2021