

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛООВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ДОВКІЛЛЯ ТА ВЕРХНІХ ШАРІВ ЗЕМЛІ УКРАЇНИ

Ю.П. Морозов¹, докт. техн. наук, Д.М. Чалаєв^{1,2}, канд. техн. наук, Н.В. Ніколаєвська¹, М.П. Добровольський²

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна.

²Інститут технічної теплофізики НАН України, 03057, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, Україна.

Проведено оцінку ефективності комбінованого використання низькопотенційної теплоти ґрунту та атмосферного повітря для роботи установок теплонасосного теплопостачання. Проведено аналіз основних положень нормативних документів ЄС та законодавчих актів України в частині віднесення теплових насосів до обладнання, яке використовує відновлювані джерела енергії та вибору критерію такого віднесення. Розглянуто мінімально допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних градацій на теплопродуктивність теплового насосу та визначено часові інтервали ефективної роботи кожного з низькопотенційних джерел. Для підвищення ефективності роботи двоконтурної теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтової теплової труби і повітряного теплообмінника на базі двофазного гравітаційного термосифону. Розглянуто вихідні дані та припущення для оцінки теплового потенціалу верхніх шарів Землі, який може використовуватись для геотермального теплопостачання з застосуванням теплових насосів. Виконано порівняння енергетичних характеристик геотермального і повітряного теплового насосу при їх автономній і комбінованій роботі протягом року в кліматичних умовах міста Києва і показано, що комбіноване використання низькопотенційної теплоти атмосферного повітря і ґрунту дозволяє в 1,2 рази збільшити річну теплопродуктивність теплонасосної системи. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря, як теплоносія, є те, що повітряні теплові насоси можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності теплового насоса при річному циклі його роботи є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність теплового насоса протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями. Бібл.11, табл.2, рис.4.

Ключові слова: енергетичний потенціал повітря, верхні шари землі, теплові насоси, енергетична ефективність.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF USING THE THERMAL POTENTIAL OF THE ENVIRONMENT AND THE TOP LAYERS OF THE LAND OF UKRAINE

Y. Morozov¹, doctor of technical sciences, D. Chalaev^{1,2}, candidate of technical sciences, N. Nikolaievska¹, M. Dobrovolskyi²

¹Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 02094, 20A, Hnata Hotkevycha St., Kyiv, Ukraine.

²Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 03057, 2a, Maria Kapnist, St., Kyiv, Ukraine.

An assessment of the effectiveness of the combined use of low-potential soil heat and atmospheric air for the operation of a heat pump heat supply unit has been carried out. The analysis of the main provisions of the EU regulatory documents and legislative acts of Ukraine in terms of attributing heat pumps to equipment that uses renewable energy sources and choosing the criterion for such attribution. The minimum permissible value of the average calculated seasonal efficiency is considered. The influence of the duration of air temperatures of various gradations on the heat pump heat output is analyzed and the time intervals for the effective operation of each of the low-potential sources are determined. To increase the efficiency of the two-circuit heat pump system, a scheme for extracting low-potential heat using a soil heat pipe and an air heat exchanger based on a two-phase gravitational thermosyphon is proposed. The initial data and assumptions for assessing the thermal potential of the upper layers of the Earth, which can be used for geothermal heat supply using heat pumps, are considered. The comparison of the energy characteristics of the geothermal and air heat pump during their autonomous and combined operation throughout the year in the climatic conditions of Kiev is carried out and it is shown that the combined use of low-potential heat of atmospheric air and soil allows to increase the annual heat output of the heat pump system by 1.2 times. Based on the studies carried out, it has been established that the advantage of air as a heat carrier is that air heat pumps can operate almost everywhere and do not require a low-temperature circuit. A promising way to increase the efficiency of a heat pump with an annual cycle of its operation is the combined use of low-potential heat of soil and air. The heat pump system with two energy sources provides high heat pump performance throughout the year and has a higher energy efficiency than traditional solutions. Bibl.11, tab.2, fig.4.

Keywords: air energy potential, upper layers of the earth, heat pumps, energy efficiency.



Ю.П. Морозов
Yu. Morozov

Відомості про автора: зав. відділом геотермальної енергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

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

Наукова сфера: відновлювана енергетика, геотермальна енергетика, використання тепла доквілля.

Публікації: більше 160.

ORCID: 0000-0003-1632-9735

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: geotherm@ukr.net

Author information: Head of the Department of Geothermal Energy of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, senior researcher.

Education: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Research area: renewable energy, geothermal energy, use of warm environment.

Publications: more than 160.

ORCID: 0000-0003-1632-9735

Contacts: tel./fax: +38(044)206-28-09

e-mail: geotherm@ukr.net



Д.М. Чалаєв
D. Chalaev

Відомості про автора: старший науковий співробітник відділу геотермальної енергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України, кандидат технічних наук. Провідний науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики НАН України.

Освіта: Московський технологічний інститут м'ясної і молочної промисловості.

Наукова сфера: відновлювані джерела енергії, теплові насоси, енергозбереження.

Публікації: більше 100.

ORCID: 0000-0002-5154-4257

Контакти: тел.: +38(044)209-07-68

e-mail: chalaev@i.ua

Author information: Senior Researcher of the Department of Geothermal Energy of the Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, Ph.D. (engineering). Leading Researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Disperse Systems of the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine.

Research area: renewable energy sources, heat pumps, energy saving.

Publications: more than 100.

ORCID: 0000-0002-5154-4257

Contacts: tel.: +38 (044) 209-07-68

e-mail: chalaev@i.ua



Н.В. Ніколаєвська
N. Nikolaievskaya

Відомості про автора: молодший науковий співробітник відділу геотермальної енергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України.

Освіта: Володимирський політехнічний інститут.

Наукова сфера: відновлювана енергетика; геотермальна енергетика; використання тепла доквілля.

Публікації: більше 20.

ORCID: 0000-0002-9997-4627

Контакти: тел./факс: +38(044)206-28-09

e-mail: geotherm@ukr.net

Author information: junior researcher of the department Institute of Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine.

Education: Vladimir Polytechnic Institute.

Research area: renewable energy; geothermal energy; use of warm environment.

Publications: more than 20.

ORCID: 0000-0002-9997-4627

Contacts: tel./fax: +38(044)206-28-09

e-mail: geotherm@ukr.net



М.П. Добровольський
M. Dobrovolskyi

Відомості про автора: аспірант Інституту технічної теплофізики НАН України.

Освіта: Київський національний університет будівництва та архітектури.

Наукова сфера: відновлювана енергетика, використання тепла доквілля, теплоенергетика.

Публікації: 3.

ORCID: 0000-0001-9140-5158

Контакти: тел./факс: +38(066)950-27-56

e-mail: Dobrik316@gmail.com

Author information: postgraduate student of the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine.

Education: Kyiv National University of Construction and Architecture.

Research area: renewable energy, use of warm environment, heat power engineering.

Publications: 3.

ORCID: 0000-0001-9140-5158

Contacts: tel./fax: +38(066)950-27-65

e-mail: Dobrik316@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

ЄС – Європейський союз;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

η – коефіцієнт корисної дії енергетичної системи з виробництва електричної енергії;

SPF_0 – мінімально допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії;

V – середня швидкість вітру, м/с;

k – середнє зняття теплоти с 1 м³ повітря, кДж/м³;

S – загальна площа житлового мікрорайону, м²;

H – середня висота житлових будинків, м;

P – частка площі, яка зайнята під житлові будівлі;

COP – коефіцієнт перетворення теплового насосу.

Вступ. До природних джерел теплоти довкілля належать атмосферне повітря, води річок, озер, морів, верхній шар ґрунту та ґрунтові води. Також можна умовно віднести поверхневі стічні води. Згідно з директивою 2009/28/ЄС геотермальною є енергія, яка була накопичена у вигляді теплової енергії під твердим шаром земної поверхні.

Тепловий потенціал річок, озер та морів нами не розглядається, тому що водонаповненість річок і озер суттєво залежить від господарської діяльності людини і має невизначений характер. Основні положення нормативних документів ЄС, що стосуються теплових насосів, знайшли відображення в законодавчих актах України, зокрема в Законі України від 01.11.2016 № 1711-VII «Про внесення змін в Закон України «Про альтернативні джерела енергії в частині віднесення теплових насосів до обладнання, яке використовує відновлювані джерела енергії». Основні зміни внесені до статті 10 Закону України «Про альтернативні джерела енергії». Нова редакція статті 10 містить загальні умови віднесення теплових насосів до обладнання відновлювальної енергетики: «Отриману за допомогою теплових насосів аеротермальну, геотермальну та гідротермальну енергію слід вважати отриманою з відновлювальних джерел за умови, що кінцевий вихід енергії значно перевищує споживання первинної енергії, яка необхідна для приводу теплових насосів» [1]. Геотермальна енергія або теплота Землі поділяється на повсюдно-розповсюджені та геотермальні родовища [2].

Поширені геотермальні ресурси – це верхні шари Землі. Їх можна використовувати в якості джерела теплової енергії шляхом застосування теплових насосів, які набувають поширення в Україні, стаючи звичним видом теплоджерел для систем теплопостачання. Аналіз даних імпорту теплових насосів усіх типів в Україну за 2001-2015 рр. дозволяє орієнтовно оцінити їхню

накопичену теплову потужність рівнем 1500 МВт [3].

Мета та завдання. Основним завданням статті є порівняння ефективності використання різних типів теплових насосів, які використовують теплову енергію верхніх шарів Землі та атмосферне повітря.

Результати досліджень. Геотермальна енергія верхніх шарів Землі та тепла енергія повітря використовується для опалення приміщень за допомогою теплових насосів. В зв'язку зі згаданою директивою ЄС верхні шари ґрунту та ґрунтові води належать до геотермальних ресурсів в рамках енергії довкілля. Для підвищення ефективності роботи двоконтурної теплонасосної системи запропоновано схему вилучення низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтової теплової труби і повітряного теплообмінника на базі двофазного гравітаційного термосифону. Критерієм віднесення теплового насосу до установок відновлюваної енергетики Директивою [1] встановлюється мінімально допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії (ККД) зазначених теплових насосів (SPF_0), який дорівнює:

$$SPF_0 = 1,15/\eta, \quad (1)$$

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).

Розрахункове значення ККД енергосистем ЄС станом на 2010 рік становило 45,9%, що відповідає значенню SPF_0 для теплових насосів з

електричним приводом на рівні 2,5. Розрахунки електричного ККД енергетичної системи України за методикою Eurostat, які наведено в [4], та відповідно до даних енергетичного балансу України за 2010 рік, опублікованого Державною службою статистики України [4], дають значення SPF₀ на рівні 3,2.

Статистичні дані Європейської асоціації теплових насосів (European Heat Pump Association, ЕНПА) показують, що середньорічні значення SPF і річна тривалість роботи різних типів теплових насосів змінюються в залежності від кліматичної зони, в якій експлуатується обладнання [5]. Величини цих параметрів для регіонів з холодним, середнім і теплим кліматом наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Середньорічні значення SPF і середньорічна тривалість використання теплових насосів в різних кліматичних зонах.

Table 1. Average annual SPF values and average annual duration of use of heat pumps in different climatic zones.

Тип теплового насоса		Кліматична зона		
		холодна	середня	тепла
повітря-вода	Величина SPF	2,5	2,6	2,7
	Час роботи за рік, годин	1710	1640	1170
вода-вода (грунт-вода)	Величина SPF	3,5	3,5	3,5
	Час роботи за рік, годин	2470	2070	1340

Тепловий потенціал повітря. На теперішній час серед теплових насосів з різними джерелами низькопотенційного тепла найбільш широко використовуються установки типу «повітря-вода» і «повітря-повітря». Це пояснюється тим, що повітряні теплові насоси не вимагають облаштування зовнішнього низькотемпературного контуру і можуть працювати практично всюди. Однак, через значні коливання температури зовнішнього повітря протягом року, ці системи характеризуються змінними енергетичними характеристиками, які мають тенденцію до зниження в найхолодніші періоди, коли потреба в теплі максимальна. Крім того, енергетична ефективність повітряних теплових насосів при мінусовій температурі атмосферного повітря знижується також через втрати енергії на періодичне розморожування випарника.

Для вилучення із атмосферного повітря 1 кВт·год теплоти необхідно прокачати через випарник теплового насоса близько 1000 м³ повітря. З урахуванням цього, тепловий потенціал повітряного басейну міського житлового мікрорайону з високою щільністю забудови можна оцінити приблизною величиною:

$$Q = k \cdot V \cdot H \cdot \sqrt{S \cdot (1 - P)}, \quad (2)$$

де k – середнє зняття теплоти с 1 м³ повітря, кДж/м³; S – загальна площа житлового мікрорайону, м²; H – середня висота житлових будинків, м; P – частка площі, яка зайнята під житлові будівлі, V – середня швидкість вітру, м/с.

У зимовий час енергетично більш ефективні геотермальні теплонасосні системи «грунт-вода» і «вода-вода», які працюють з використанням низькопотенційної теплоти ґрунту (або підземних ґрунтових вод) і мають високий коефіцієнт перетворення COP, який не залежить від пори року. Незважаючи на те, що такі теплонасосні системи мають кращі енергетичні характеристики, їх використання обмежено, що пов'язано з високою вартістю робіт, яке обумовлено облаштуванням поля вертикальних бурових свердловин (або горизонтальних ґрунтових теплообмінників).

Слід зауважити, що ґрунт є кращим джерелом низькопотенційної теплоти тільки протягом тієї частини опалювального періоду, коли температура ґрунту перевищує температуру атмосферного повітря. В інші пори року енергетично більш ефективним є використання теплоти атмосферного повітря. Аналізуючи коливання температури атмосферного повітря протягом року, можна виділити періоди часу, коли при цілорічному циклі роботи теплового насоса (опалення взимку і гаряче водопостачання влітку),

система «повітря-вода» більш ефективна, ніж «грунт-вода». Таке комбіноване використання двох джерел низькопотенційної теплоти дозволить значно поліпшити показники середньорічної ефективності роботи теплового насоса.

Системи теплонасосного теплопостачання. Багатьма авторами вже були досліджені теплонасосні системи з двома джерелами низькопотенційної теплоти [6, 7]. У цих роботах система збору низькопотенційної теплоти складається з повітряного теплообмінника типу «Dry cooler» і ґрунтового теплообмінника, які через контур проміжного теплоносія підключені паралельно до випарника теплового насоса. Електрокерований триходовий клапан перемикає потік теплоносія або на повітряний, або на ґрунтовий теплообмінник. В роботі [6] зазначається, що комбіноване використання

теплоти ґрунту та атмосферного повітря знижує теплове навантаження на ґрунтовий масив, що дозволяє зменшити розміри ґрунтового теплообмінника і зберегти більш високу температуру ґрунту протягом опалювального сезону. Як наслідок, вдається отримати більш високе значення коефіцієнту трансформації і заощадити близько 13 % електричної енергії на привод теплового насоса.

Для підвищення ефективності роботи двоконтурної теплонасосної системи нами розроблено схему видобування низькопотенційної теплоти з використанням ґрунтової теплової труби і повітряного теплообмінника на базі двофазного гравітаційного термосифону [8]. Конденсаційні зони теплової труби і повітряного теплообмінника через замкнутий контур циркуляції теплоносія підключені до випарника теплового насоса. (рис.1).

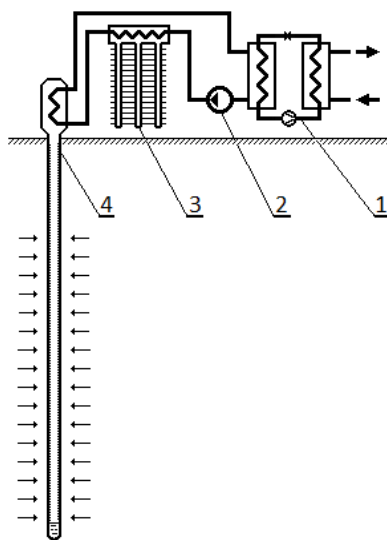


Рис. 1. Принципова схема системи теплонасосного теплопостачання з двома джерелами низькопотенційної теплоти: 1 – тепловий насос; 2 – циркуляційний насос низькопотенційного теплоносія; 3 – повітряний теплообмінник; 4 – ґрунтовий теплообмінник.

Fig. 1. Schematic diagram of the heat pump heat supply system with two sources of low-potential heat: 1 – heat pump; 2 – circulation pump for low-grade heat carrier; 3 – air heat exchanger; 4 – ground heat exchanger.

Використання гравітаційних термосифонів дозволяє спростити управління системою вилучення тепла і максимально ефективно використовувати температурний потенціал обох джерел низькопотенційної теплоти. У процесі роботи термосифонного теплообмінного апарату легкокиплячий агент кипить в випарній зоні і відбирає теплоту від ґрунту або повітря. Пара, яка утворюється при кипінні агенту, надходить в конденсаційну зону, і конденсується віддаючи

теплоту циркулюючому теплоносію, а рідкий агент стікає назад в випарну зону. Специфіка роботи конденсаційно-випарного гравітаційного термосифона полягає в тому, що він передає теплоту тільки в тому випадку, коли температура конденсаційної зони (теплоносія) нижче, ніж температура випарної зони (ґрунту, повітря). Внаслідок цього циркулюючий теплоносій автоматично відбирає теплоту від того джерела

низькопотенційної теплоти, температура якого є вищою.

При розрахунку енергетичних показників комбінованої системи теплопостачання нами були використані емпіричні формули для обчислення COP теплових насосів «повітря-вода» і «грунт-вода», які отримані шляхом усереднення графіків залежності COP від різниці температур ΔT між конденсатором і випарником для більш ніж 100 комерційних моделей побутових теплових насосів потужністю до 20 кВт [9].

Залежність для розрахунку COP теплового насоса «повітря-вода» [9]:

$$COP_{П-В} = 6,81 - 0,121 \cdot \Delta T + 0,00063 \cdot \Delta T^2, \quad (3)$$

для $15 \leq \Delta T \leq 60$

Залежність для розрахунку COP теплового насоса «грунт-вода» [9]:

$$COP_{Г-В} = 8,77 - 0,15 \cdot \Delta T + 0,000734 \cdot \Delta T^2, \quad (4)$$

для $20 \leq \Delta T \leq 60$

$$\Delta T = T_k - T_v, \quad (5)$$

де T_k – температура конденсатора, (°C); T_v – температура випарника, (°C).

При однакових температурних режимах роботи тепловий насос «грунт-вода» має більш високі значення COP в порівнянні з тепловим насосом «повітря-вода». Це обумовлено тим, що об'ємна теплоємність повітря набагато менша, ніж у води, і на переміщення повітря через теплообмінник витрачається більше електроенергії в розрахунку на одиницю теплопродуктивності.

Як приклад, порівняємо сумарну річну теплопродуктивність повітряного і геотермального теплового насоса при роботі для забезпечення опалення та гарячого водопостачання в кліматичних умовах м. Києва. У розрахунках температуру нагрівання води в тепловому насосі приймаємо не нижче 55 °C, що відповідає гігієнічним вимогам до забезпечення безпеки систем гарячого водопостачання. Температуру ґрунтового масиву вважаємо постійною протягом року і рівній 10 °C. Значення температур атмосферного повітря та тривалість періодів з температурою повітря різних градацій приймаємо згідно з даними [11], (рис. 2).

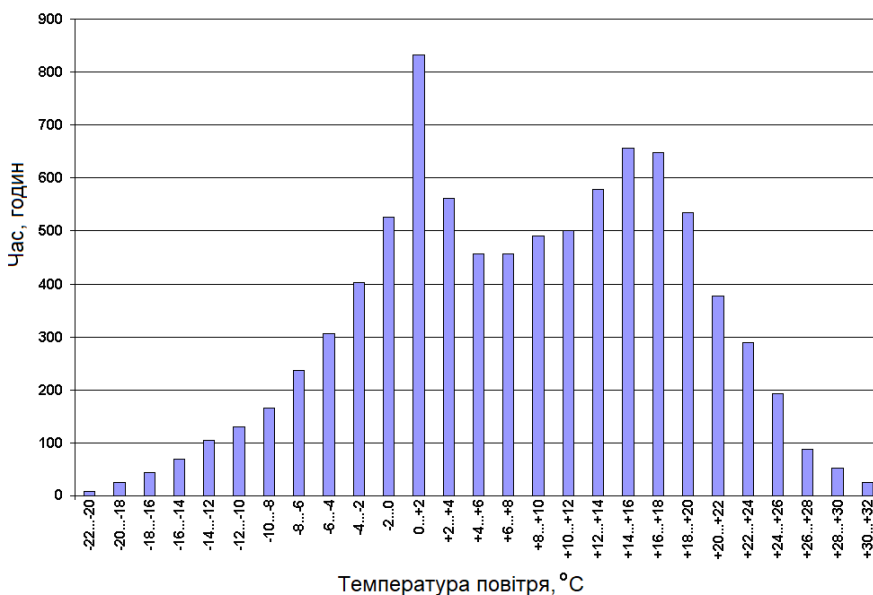


Рис. 2. Середня тривалість температури повітря різних градацій в м. Києві.

Fig. 2. Average duration of air temperature of various gradations in Kiev.

Кількість теплової енергії, яка виробляється повітряним тепловим насосом при зазначених на гістограмі температурах повітря, розраховувалося з урахуванням тривалості даної температури і відповідного цій температурі значення коефіцієнта перетворення COP, яке обчислювалося за

залежностями (2), (3). Для порівняння ефективності теплонасосних систем в однакові періоди часу визначалася теплопродуктивність геотермального теплового насоса в тих же температурно-часових інтервалах.

Теплопродуктивність повітряного теплового насоса залежить від температури повітря і за час стояння заданої температури повітря складає:

$$Q_{П-В}^i = N_{ел} \cdot [6,81 - 0,121 \cdot \Delta T_i + 0,00063 \cdot \Delta T_i^2] \cdot \tau_i, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (6)$$

де $N_{ел}$ – споживана тепловим насосом електрична потужність, τ_i – час стояння заданої температури повітря.

Різниця між температурами теплоносія і повітря складає:

$$\Delta T_i = T_{нагр} - T_{пов}^i, \quad (7)$$

де $T_{нагр}$ – температура нагріву теплоносія в тепловому насосі (°C), $T_{пов}^i$ – задана температура повітря, (°C);

Теплопродуктивність геотермального теплового насоса за той же час дорівнює:

$$Q_{Г-В}^i = N_{ел} \cdot [8,77 - 0,15 \cdot \Delta T + 0,000734 \cdot \Delta T^2] \cdot \tau_i, \text{ кВт}\cdot\text{год}, \quad (8)$$

Різниця між температурами теплоносія і ґрунту дорівнює:

$$\Delta T = T_{нагр} - T_{гр}, \quad (9)$$

де $T_{нагр}$ – температура нагріву теплоносія в тепловому насосі (°C), $T_{гр}$ – температура ґрунту, (°C).

В обох випадках споживана електрична потужність прийнята рівною 1 кВт. Отримані величини теплопродуктивності геотермального і повітряного теплового насоса при їх цілолітній роботі наведені на рис. 3.

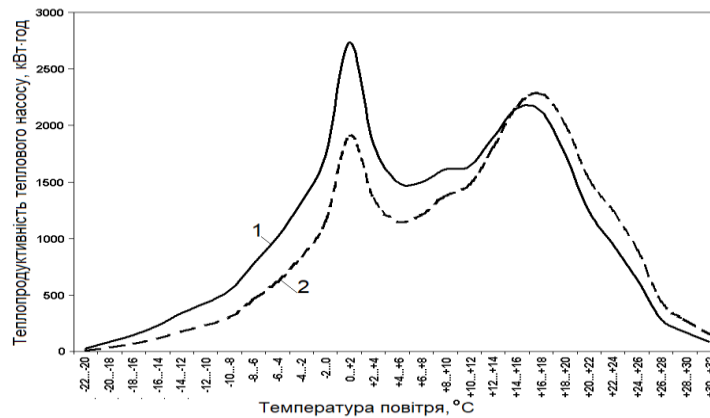


Рис. 3. Вплив тривалості температур повітря різних градаций на теплопродуктивність теплового насоса протягом року: 1 – геотермальний тепловий насос; 2 – повітряний тепловий насос.

Fig. 3. Influence of the duration of air temperatures of various gradations on the heat output of the heat pump throughout the year: 1 - geothermal heat pump; 2 - air source heat pump.

Як видно з графіків, більшу частину року, починаючи з мінімальних температур атмосферного повітря -22...-20°C і до досягнення температур +14...+16°C, більш ефективно працює тепловий насос «ґрунт-вода». Тривалість цього періоду становить 6300 годин або 0,7 року. При цьому максимальна різниця в кількості виробленої теплової енергії порівнюваними теплонасосними системами доводиться на часовий період з температурою навколишнього середовища 0...+2°C.

Відповідно, період більш ефективної роботи повітряного теплового насоса в порівнянні з геотермальним припадає на теплу пору року, коли температура атмосферного повітря перевищує +15°C (рис. 3). Влітку у Києві повітря може

прогріватися до 32°C, але найбільш тривалим за часом є період з температурами повітря 17 - 18°C (рис. 2). Загальна теплопродуктивність повітряного теплового насоса в теплу пору, яка становить менше третини року (2540 годин), складає майже половину річної теплопродуктивності. Середньомісячні значення коефіцієнту перетворення геотермального теплового насоса на протязі всього року має практичне постійне значення. Температура низькопотенційного теплоносія, якщо глибина свердловини становить більше 10 метрів, постійна. Для геотермічних умов Києва вона становить 8 - 12°C. Середньомісячні значення коефіцієнту перетворення геотермального і повітряного теплового насоса наведено на рисунку 4.

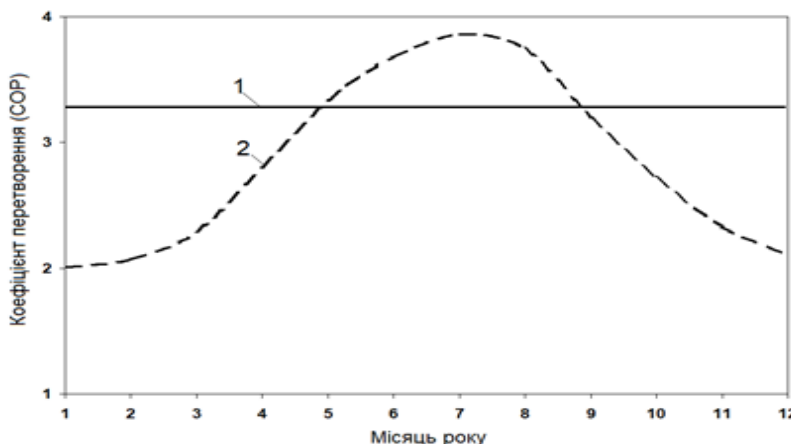


Рис. 4. Середньомісячні значення коефіцієнту перетворення геотермального теплового насосу і повітряного теплового насосу: 1 – геотермальний тепловий насос; 2 – повітряний тепловий насос.

Fig. 4. Average monthly values of the conversion factor of geothermal heat pump and air source heat pump: 1 - geothermal heat pump; 2 - air source heat pump.

У зв'язку з цим має сенс визначити ефективність комбінованого використання теплового потенціалу доквілля і верхніх шарів Землі для роботи установок теплонасосного теплопостачання. В таблиці 2 наведено розрахункові дані питомої теплопродуктивності (кВт·год виробленої теплової енергії на 1 кВт споживаної електроенергії) геотермального і повітряного теплового насосу при їх автономної і

комбінованої роботі протягом року в кліматичних умовах міста Києва. Результати розрахунку показують, що комбіноване використання низькопотенційної теплоти атмосферного повітря і ґрунту дозволяє при однаковому електроспоживанні в 1,2 рази збільшити річну теплопродуктивність в порівнянні з повітряним тепловим насосом 2.

Таблиця 2. Енергетичні показники автономної і комбінованої роботи повітряного теплового насосу і геотермального теплового насосу.

Table 2. Energy indicators of autonomous and combined operation of air source heat pump and geothermal heat pump.

Тип теплонасосної системи	Вироблення теплової енергії за рік, кВт·год	Вироблення теплової енергії за опалювальний період, кВт·год	Вироблення теплової енергії за неопалювальний період, кВт·год	Середній COP за рік
повітряна	25290	9630	15660	2,9
геотермальна	28750	14200	14550	3,3
комбінована	30350	14200	16150	3,5

Висновки. На теперішній час в системах теплонасосного теплопостачання найбільш широкое практичне застосування отримали теплонасосні установки типу «повітря-вода» і «ґрунт-вода». Використання кожного з цих джерел низькопотенційної теплоти має свої переваги і недоліки. Перевагою повітря, як теплоносія, є те, що повітряні теплові насоси можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Однак, через значні коливання температури зовнішнього повітря

протягом року, ці системи характеризуються змінними енергетичними характеристиками, які мають тенденцію до зниження в найхолодніші періоди, коли потреба в теплі максимальна. На відміну від повітря ґрунт, як джерело низькопотенційної теплоти, відрізняється постійністю температури протягом усього року, однак, слід зауважити, що ґрунт є кращим джерелом теплоти тільки протягом тієї частини року, коли температура ґрунту перевищує температуру атмосферного повітря. В іншу пору

року енергетично більш ефективним є використання теплоти атмосферного повітря. Перспективним способом підвищення ефективності теплового насоса при річному циклі його роботи (опалення взимку і гаряче водопостачання влітку) є комбіноване використання низькопотенційної теплоти ґрунту та повітря. Теплонасосна система з двома джерелами енергії забезпечує високу теплопродуктивність теплового насоса протягом всього року і має більш високий показник енергетичної ефективності у порівнянні з традиційними рішеннями.

1. 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. L 140/16 -L140/62.

2. Морозов Ю.П. Добыча геотермальных ресурсов и аккумулярование теплоты в подземных горизонтах. Монография. Киев. Наукова думка. 2017. 197с.

3. Басок Б., Дубовской С. Методологические особенности оценки располагаемой мощности тепловых насосов в Украине. Насосы и оборудование. 2017. № 3(104). С. 42-44.

4. Мінімальне допустиме значення середнього розрахункового сезонного коефіцієнту корисної дії. Державний комітет статистики України. [Електронний ресурс]. URL: <http://ukrstat.gov.ua>.

5. The heat pump stock of 13.3 m (12 %) units in 2019 contributed. URL: http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards. (дата звернення 25.10.2020).

6. Васильев Г.П., Горнов В.Ф., Колесова М.В. Исследование оценки эффективности комбинированного использования тепла грунта и атмосферного воздуха в теплонасосных системах теплоснабжения. Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. № 1(55). С. 20-24.

7. Hou G., Taherian H. Performance analysis of a hybrid ground source heat pump system integrated with liquid dry cooler. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 159.113830 p. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113830>.

8. Морозов Ю.П., Чалаев Д.М., Величко В.В. Патент на винахід № 125076. Україна. МПК F28D 15/00, F28D 15/02. Гравітаційна теплова труба. Заявл. 14.12.2017. Опубл. 25.04.2018. Бюл. № 8.

9. Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A. A review of domestic heat pumps. Energy Environ. Sci. 2012. № 5. Pp. 9291-9306. <https://doi.org/10.1039/C2EE22653G>.

10. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. Введ. 01.11.2011. К. Укрархбудінформ. 2011. 123 с.

11. Строительная климатология. Справочное пособие к СНиП 23-01-99. М. Стройиздат. 1990. 86 с.

REFERENCES

1. Dyrektyva Yevropeyskoho Parlamentu ta Rady 2009/28/YES vid 23 kvitnya 2009 roku. Pro zaokhochennya do vykorystannya enerhiyi, vyroblenoyi z vidnovlyuvanykh dzherel toshcho. [Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of energy produced from renewable sources, etc.] Official Journal of the European Union 5.6.2009. L140/16-L140/62. [in Ukrainian].

2. Morozov Yu.P. Dobycha heotermalnykh resursov y akkumulyrovanye teploty v podzemnykh horizontakh. [Extraction of geothermal resources and accumulation of heat in underground horizons]. Monograph. Kiev. Naukova dumka. 2017. 197 p. [in Russian].

3. Basok B., Dubovskoy S. Metodolohycheskye osobennosti otsenky raspolahaemoy moshchnosti teplovykh nasosov v Ukraine. Nasosy y oborudovanye. [Methodological features of assessing the available capacity of heat pumps in Ukraine]. Pumps and equipment. 2017. No. 3(104). Pp. 42-44. [in Russian].

4. Minimalne dopustyme znachennya serednoho rozrakhunkovoho sezonnoho koefitsiyentu korisnoyi diyi. [The minimum permissible value of the average rorachunkovy seasonal factor of the coriander]. State Committee of Statistics of Ukraine. [Electronic resource]. URL: <http://ukrstat.gov.ua>. Name from the screen. [in English].

5. The heat pump stock of 13.3m (12%) units in 2019 contributed. URL: http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards. (Applying date: 25.10.2020). [in English].

6. Vasiliev G.P., Gornov V.F., Kolesova M.V. Yssledovanye otsenky éffektivnosti kombynyrovannoho yspol'zovanyya tepla hrunta y atmosfernoho vozdukha v teplonasosnykh systemakh teplokhladosnabzhenyya. [Study of evaluation of efficiency of combined use of soil heat and atmospheric air in heat pump systems of heat and cold supply]. Energy security and energy saving. 2014. No. 1(55). Pp. 20-24. [in Russian].

7. Hou G., Taherian H. Performance analysis of a hybrid ground source heat pump system integrated with liquid dry cooler. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 159.113830 p. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113830>. [in English].

8. Morozov YP, Chalaev DM, Velichko VV Patent na vynakhid № 125076. [Patent for invention № 125076]. Ukraine. IPC F28D 15/00, F28D 15/02. Gravitational heat pipe. Application 12/14/2017 Publ. 04/25/2018 Bull. No. 8. [in Ukrainian].

9. Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A. A review of domestic heat pumps. Energy Environ. Sci. 2012. № 5. Pp. 9291-9306. <https://doi.org/10.1039/C2EE22653G>. [in English].

10. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Budivel'na klimatolohiya. [DSTU-N B V.1.1-27: 2010 Budivelná klimatologiya]. Entering 01.11.2011. K. Ukrhhbudinform. 2011. 123 p. [in Ukrainian].

11. Stroytel'naya klymatolohyya. [Construction climatology]. Reference manual to SNiP 23-01-99. M. Stroyizdat. 1990. 86 p. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 09.11.20

Остаточна версія 14.12.20