

## ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВИКОРИСТАННЯ ВІДКРИТИХ ТА МОДУЛЬНИХ ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМ

**Олексій Зур'ян**

кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України, вул. Гната Хоткевича, 20А, Київ, Україна, 02094, alexey\_zuryan@ukr.net

**ORCID: 0000-0002-2391-1611**

У роботі наведено дані щодо ефективності використання відновлюваної низькопотенційної енергії ґрунту для роботи геотермальних теплонасосних систем, які вже широко застосовуються в екологічно безпечних та економічно рентабельних енергетичних системах. Разом із тим використання низькопотенційної енергії води відкритих водойм у гідротермальних теплонасосних системах ще не має широкого застосування. Обґрунтовано, що наявні гідротермальні системи не завжди адаптовані до умов експлуатації та місця розташування об'єкта, актуальним залишається питання наукового підходу до розроблення технологічної конструкції гідротермального колектора, методології оптимального його розміщення й визначення ефективності залежно від умов експлуатації. Науковою новизною нового технологічного підходу є техніко-економічне обґрунтування доцільності використання водяного колектора спеціальної конструкції, який має модульну структуру й складається з декількох функціонально пов'язаних водяних зондів. У роботі наведено результати проведених експериментальних досліджень ефективності роботи гідротермальної теплонасосної системи, де як відновлюване первинне джерело теплової енергії для роботи теплового насоса використовується низькопотенційна тепла енергія води. Представлено розроблену і сконструйовану експериментальну гідротермальну теплонасосну систему (ГідроТС), яка складається з теплового насоса та теплообмінника, зануреного у водойму, виконано роботи з установлення гребінок подачі та повернення теплоносія до теплообмінника, через які забезпечується циркуляція розчину пропіленгліколю від водяного колектора до теплового насоса. На основі експериментально отриманих даних визначено коефіцієнт перетворення даної системи та розраховано строк окупності. Доведено, що 40% вартості гідротермальної системи припадає на водяний колектор та монтажні роботи на його встановлення. Запропоновано та науково обґрунтовано інноваційні конструкторські рішення систем відбору низькопотенційної енергії води та систем її перетворення для опалення, кондиціонування, гарячого водопостачання та забезпечення технологічних потреб споживачів як для автономної роботи в польових умовах, так і техногенно навантажених урбосистем.

**Ключові слова:** гідросфера, відкрита водойма, тепловий насос, гідротермальна система, енергоефективність.

**Актуальність роботи.** Основні принципи сталого розвитку людства значною мірою базуються на використанні відновлюваних джерел енергії – це питання екології, доступу до енергоресурсів, захисту здоров'я, запобігання змінам клімату. Вирішення цих та інших проблем можливе шляхом декарбонізації економіки і переходу до чистих джерел енергії: сонця, вітру, теплоти навколишнього середовища, «зеленого» водню. Для України ці питання набувають особливої гостроти в умовах відбудови економіки та досягнення енергетичної безпеки.

У регіонах із помірним кліматом, таких як Центральна та Північна Європа, використання та акумулювання теплової енергії ґрунту є відомою технологією для забезпечення будівель великими обсягами опалення та охолодження. Геотермальна теплонасосна система (ГеоТНС) долає сезонну невідповідність між температурою навколишнього середовища та потребою будівлі в опаленні або охолодженні. ГеоТНС – це дво-

направлена система з відкритим контуром, яка використовує щонайменше одну або декілька свердловин із установленими у них теплообмінниками для активного накопичення надлишкової теплоти влітку і холоду взимку.

У кліматичних та географічних умовах України одним із перспективних напрямів використання відновлюваної енергетики є застосування гідротермальних теплонасосних систем (ГідроТС).

Для отримання необхідної первинної енергії для роботи теплового насоса в ГідроТС використовуються системи відбору низькопотенційної теплової енергії, які складаються з гідротермального теплообмінника, встановленого у водойму, у якому по замкнутому контуру циркулює теплоносій (закрита ГідроТС) або здійснюється безпосередній забір води з водойми або водоносного горизонту, розкритого свердловинами, яка безпосередньо використовується як теплоносій для роботи теплового насоса (відкрита ГідроТС).

Протягом останніх 20 років у світі було науково обґрунтовано та розроблено технологію і побудовано велику кількість діючих систем теплопостачання на теплових насосах.

Питанням досвіду використання теплонасосних систем в Україні та світі, де як первинне джерело енергії використовується низькопотенційна енергія приповерхневих шарів Землі, присвячена велика кількість досліджень. Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи щодо використання низькопотенційної теплової енергії приповерхневих шарів ґрунту за допомогою теплових насосів проводяться як в Україні, так і у світі вже тривалий час [1–3]. Відомо, що надлишкове тепло, отримане в процесі охолодження, можливо зберігати в ґрунті [4–6]. Дослідження щодо встановлення теплового балансу в ґрунті під час експлуатації ГеоТНС описано в роботах [7; 8]. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу довкілля та верхніх шарів землі України виконана авторами [9–11]. Техніко-економічний аналіз упровадження теплонасосних систем із геотермальними теплообмінниками було висвітлено в роботах [12; 13]. Проводяться активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності акумулювання тепла та холоду шляхом використання води підземних горизонтів [14–19].

Основна відмінність теплового насоса від інших перетворювачів відновлюваної енергії полягає у тому, що під час виробництва тепла до 80% енергії витягується з навколишнього середовища (для гідротермальних систем – води відкритих водойм або водоносних горизонтів). Однак така система має й недоліки, які визначаються суттєвою залежністю її ефективності від стабільності дебіту свердловини та температури води на виході з теплообмінника, зануреного у природне середовище.

Поверхневі води є вискоефективним джерелом відновлюваної низькопотенційної енергії, однак під час проектування таких систем важливо враховувати гідрологічний режим водного об'єкта. Сутність гідрологічного режиму водних об'єктів – це зміни гідрологічних характеристик у просторі та часі.

Гідрологічний стан водного об'єкта подібно до погоди стосовно стану атмосфери схильний до постійних просторово-часових змін. Цей стан залежить від багатьох чинників і визначається характером процесів, що відбуваються у самому водному об'єкті, його зв'язком з іншими водними

об'єктами, атмосферою, літосферою, впливом господарської діяльності людини і т. п. Сукупність змін гідрологічного стану водного об'єкта, що закономірно повторюються, це і є його гідрологічний режим. Оскільки на температуру води у річці впливають зміни температури повітря, основна причина тимчасових змін температури води у річках – метеорологічна.

В умовах помірного клімату найбільш типовими є сезонні зміни температури води в річках. Узимку під крижаним покривом вода біля річки має температуру близько 0°C. Навесні у період підвищення температури повітря та восени в період її зниження зміни температури води йдуть із деяким відставанням за змінами температури повітря. Максимальна температура води за величиною менша за максимальну температуру повітря (наприклад, на річках Київщини ці температури відповідно дорівнюють приблизно 22–24 і 28–30°C). Максимум температури води настає пізніше максимальної температури повітря. У зв'язку з тим, що температура води в річках, як правило, не може набувати негативних значень, середньорічна температура води в річках помітно вища, ніж середньорічна температура повітря.

Окрім сезонних коливань температури води у річках, звичайні її добові зміни, що також відстають від зміни температури повітря. Мінімальна температура води зазвичай спостерігається в ранковий час, максимальна – о 15–17 годині (максимум температури повітря зазвичай настає на 1–2 години раніше). На великих річках добові зміни температури води зазвичай не більше 1–2°C, на малих річках вони можуть бути помітно більшими.

За температур близько 0°C вода стає менш щільною та легшою, тому за охолодження води у водоймищі до +4°C припиняється конвекційне перемішування води, подальше її охолодження відбувається лише за рахунок теплопровідності (а вона у води не дуже висока), і процеси охолодження води різко уповільнюються. Навіть у люті морози у глибокій річці під товстим шаром льоду та шаром холодної води завжди буде вода з температурою +4°C. До дна промерзають лише дрібні ставки та озера. Тому з урахуванням того, що природна водойма є складовою частиною технічного пристрою (ГідроТНС), актуальним науково-технічним завданням є визначення технічних особливостей побудови систем вилучення низькопотенційної теплової енергії з поверхневих вод та обґрунтування економічних переваг

використання відкритих та модульних гідротермальних теплонасосних систем.

**Метою роботи** є шляхом аналізу експериментально отриманих даних змін температури води у водоймі, дебіту та температур на вході у випарник та виході з конденсатора теплового насосу розрахувати основні показники ефективності системи та визначити конструктивні особливості теплообмінного пристрою, упровадження яких може позитивно впливати на рентабельність, ефективність та надійність гідротермальної теплонасосної системи.

Відповідно до поставленої мети дослідження, мають бути вирішені такі завдання: по-перше, аналіз експериментально отриманих даних температур у контрольних точках гідротермальної системи, визначення коефіцієнта перетворення; по-друге, визначення коефіцієнта перетворення системи; по-третє, виконати аналіз окупності гідротермальної теплонасосної системи та визначити найбільш затратні складники в загальному балансі системи; по-четверте, запропонувати інноваційні енергоефективні, економічно привабливі технічні рішення побудови систем відбору низькопотенційної енергії води та систем її перетворення для опалення, кондиціонування, гарячого водопостачання та забезпечення технологічних потреб споживачів як для автономної роботи в польових умовах, так і техногенно навантажених урбосистем.

**Матеріал і результати досліджень.** Для визначення ефективності роботи гідротермальної теплонасосної системи закритого типу була використана експериментальна гідротермальна теплонасосна система, змонтована в Українському державному геологорозвідувальному інституті (УкрДГРІ). Система має тепловий насос потужністю 14 кВт [20].

Колектор гідротермальної теплонасосної системи закритого типу (рис. 1) являє собою два функціонально пов'язаних гідротермальних зонда, кожен з яких складається з двох пластикових труб, покладених кільцями з двох боків металевої решітки.

Уся конструкція гідротермального колектора встановлюється на дно водойми (рис. 2).

Система працює у двох режимах: теплозабезпечення і кондиціонування.

У режимі теплозабезпечення теплоносій (розчин пропіленгліколю), що циркулює по контуру, – колектор-тепловий насос потрапляє з колектора гідротермальної теплонасосної системи, зануреного на дно водойми, до конденсатора теплового насосу з температурою, що

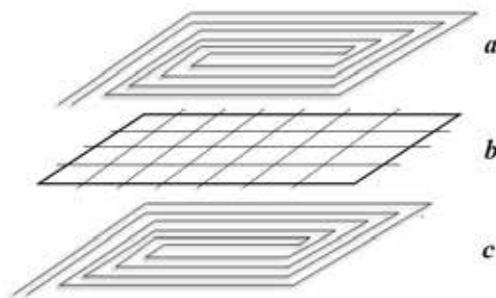


Рис. 1. Колектор гідротермальної теплонасосної системи закритого типу: а, с – гідротермальний зонд (верхній та нижній); б – металева решітка



Рис. 2. Зовнішній вигляд колектора гідротермальної теплонасосної системи закритого типу перед зануренням у водойму

відповідає температурі води у водоймі, віддає частину свого теплового потенціалу (2–3°C), після чого знову потрапляє у колектор, занурений на дно водойми, де відновлює свій тепловий потенціал. У конденсаторі фреон, що циркулює по замкнутому внутрішньому контурі за рахунок низькопотенційної теплоти підземних вод, випарюється та стискається компресором теплового насосу. Після стискання фреон із температурою 60–120°C потрапляє у конденсатор, де передає своє тепло в систему опалення будівлі через систему фанкойлів. Після чого цикл повторюється. Таким чином, забезпечується опалення приміщень.

У режимі кондиціонування теплоносій (розчин пропіленгліколю), що циркулює по контуру, – колектор-тепловий насос потрапляє з колектора гідротермальної теплонасосної системи, зануреного на дно водойми, минаючи конденсатор теплового насосу безпосередньо на фанкойли, де забирає надлишкову теплову енергію з приміщення та з температурою більшою на 2–3°C,

після чого знову потрапляє у колектор, занурений на дно водойми, де відновлює свій тепловий потенціал. Після чого цикл повторюється. Таким чином, забезпечується пасивне кондиціонування (охолодження) приміщень.

Із метою проведення досліджень до складу комплексу включено вимірювальне обладнання й автоматизовану систему управління.

Вимірювальні прилади, до складу яких входять датчики температури і датчики витрат теплоносія, установлені як у наземній, так і в підземній частині комплексу.

Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204. Термоперетворювачі опору ТСП-204 внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур – від  $-40$  до  $+270^{\circ}\text{C}$ , показник теплової інерції не більше 6–8 сек.

Також установлено датчики витрати теплоносія на кожній лінії подачі теплоносія та так само по два датчика на загальних магістралях протоку теплоносія по низькотемпературним і високотемпературним контурам наземної частини системи.

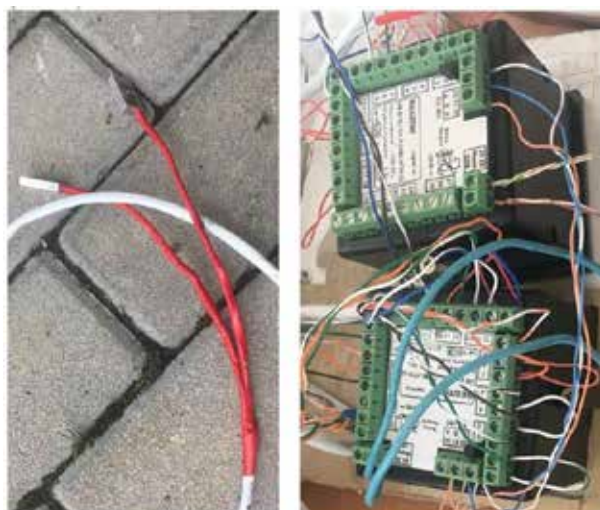
Датчики температури, встановлені в підводній частині гідротермальної теплонасосної енергетичної системи закритого типу, дають змогу вимірювати температуру води у водоймі і температуру теплоносія на вході і виході з кожного зонда колектора системи, встановленої на дні водойми глибиною 3 м.

Для прийому і перетворення сигналів, що надходять від термоперетворювачів опору ТСП-204, на значення температури і відображення їх на вбудованому цифровому індикаторі застосовувався вимірювач восьмиканальний із блоком розширення аналогових входів И8 8ТС/10-RS485-БП-12- ИПК-Щ (рис. 3).

Із метою візуалізації в режимі реального часу даних, отриманих із датчиків, запису їх в архів та відображення отриманих даних у вигляді таблиць або графіків використовувалися індикатор логер И16П RS 485/43-USBGSM-ИПР-Д і програмне забезпечення (система збору даних) РегМік.

У процесі проведення дослідження були отримані дані річних змін температур у водоймі, а також температури на вході і виході з випарника і конденсатора ТН.

Експериментально встановлено, що температура підземних вод у свердловині на глибині 50 м є досить стабільною у часі та становить у середньому  $10^{\circ}\text{C}$ . Під час дослідження було зафіксо-



a

b

Рис. 3. Пристрої для проведення вимірювань: а – термоперетворювачів опору ТСП-204; б – вимірювач восьмиканальний із блоком розширення аналогових входів И8 8ТС/10-RS485-БП-12- ИПК-Щ

вано незначні сезонні коливання температури води ( $0,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$ ) на виході зі свердловини.

Для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу з теплообмінником, що розміщується у водоймі на глибині 2,5 м, температура теплоносія на вході до випарника ТН коливається в діапазоні:  $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$  (у грудні–лютому);  $8\text{--}10^{\circ}\text{C}$  (у листопаді, квітні); до  $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$  за температури води у водоймі  $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$  (у червні–серпні).

На основі експериментально отриманих даних витрат теплоносія по контуру конденсатора і значень температур на вході і виході з конденсатора ТН розраховане значення теплової продуктивності енергетичної системи, яка становила 14 кВт по теплу та 9 кВт по холоду. Були розраховані коефіцієнти трансформації гідротермальної теплонасосної системи для трьох зимових місяців року.

Основним показником ефективності теплового насоса є коефіцієнт трансформації (тепловий коефіцієнт):

$$\varphi = Q1/N = (Q2 + N)/N = T2/(T2-T11), \quad (1)$$

де

$Q1$  – теплопродуктивність ТНУ, Вт;

$N$  – потужність компресора, Вт;

$T2$  – температура теплоносія на виході з конденсатора, К;

$T11$  – температура теплоносія на вході у випарник, К.

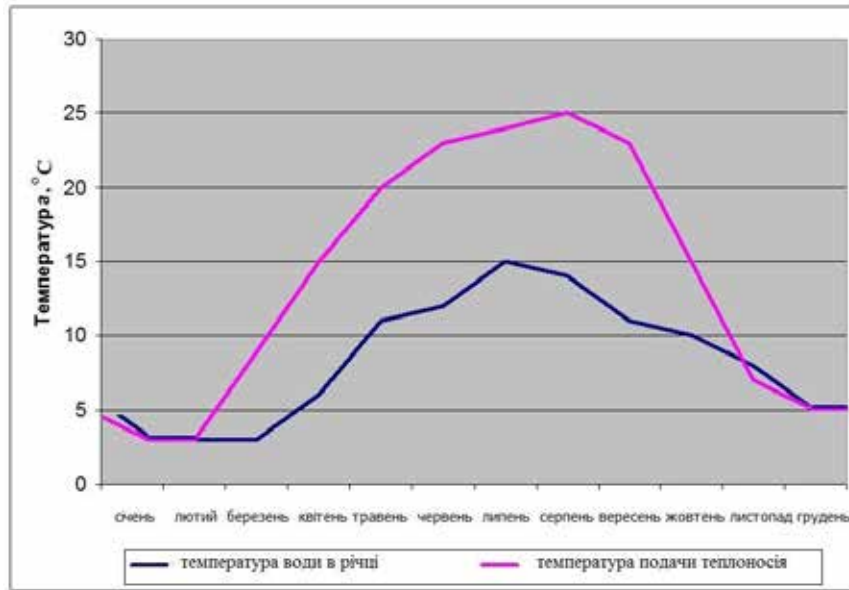


Рис. 4. Розподіл температури води в річці та температури на вході у випарник теплового насоса на протязі року

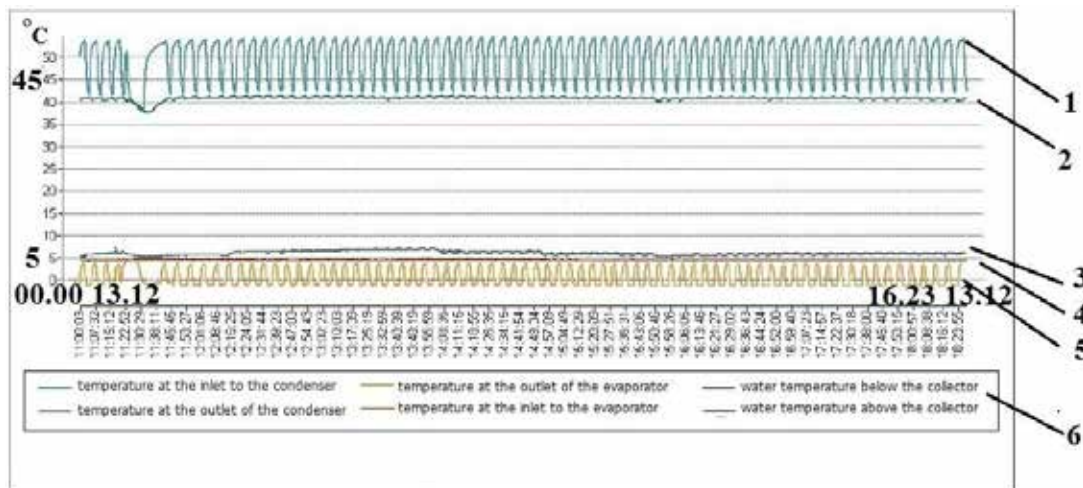


Рис. 5. Графік коливань температури в контрольних точках гідротермальної теплонасосної системи закритого типу: 1 – температура на виході з конденсатора ТН; 2 – температура на вході в конденсатор ТН; 3 – температури води в річці; 4 – температури на вході до випарника теплового насоса; 5 – температура на виході з випарника ТН; 6 – легенда системи збору даних РегМік

Дійсний коефіцієнт трансформації теплового насоса може мати вигляд:

$$\varphi = \varphi_T \eta_{ТН}, \quad (2)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт утрат, що враховує реальні процеси, що здійснюються робочим тілом у ТН, який можна прийняти за 0,5.

Зі співвідношення (1) і (2) можемо визначити дійсний коефіцієнт трансформації теплового насоса у системі з контуром теплої підлоги з температурою лінії подачі 45°C за умови, що температура первинного джерела відповідає пер-

винному джерелу теплової енергії, а саме низькопотенційній енергії води, що збирається водяним колектором.

Для гідротермальної системи теплового насоса закритого типу COP = 3,5.

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по конуру конденсатора визначався системою опалення будівлі. Ефективність системи обернено пропорційна температурі теплоносія на виході з конденсатора ТН. Як зазначалося вище, під час проведення експерименту температура на виході з конденсатора дорівнювала 45°C.

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру випарника визначався параметрами джерела низькопотенційної енергії і встановлювався на підставі аналітичних розрахунків залежно від середньої температури теплоносія на вході у випарник. Для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу 5–10°C.

Питома вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії визначалася вартістю монтажу (послуги і матеріали) колектора (для різних систем теплонасосного опалення та кондиціонування вона різна) та вартістю теплового насоса і монтажних робіт із його встановлення. Для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу вартість монтажу колектора у цінах 2022 р. становить 10–20 тис грн. За вартості матеріалів – 20–40 тис грн. Таким чином, вартість колектора на 1 кВт виробленої енергії становить на опалення 2–4 тис грн, на охолодження – 3–7 тис грн. При цьому треба враховувати, що для забезпечення кондиціонування взимку не треба використовувати сам тепловий насос, вартість якого становить 12–20 тис грн за 1 кВт, за вартості монтажу разом із додатковим обладнанням теж у діапазоні 12–20 тис грн за 1 кВт.

Параметри, що визначають опалення та охолодження будівлі, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри, що визначають опалення та охолодження будівлі

Параметр	Значення
Опалювальна площа (м <sup>2</sup> )	175
Охолоджувана площа (м <sup>2</sup> )	85
Теплова потужність (кВт)	14
Холодильна потужність (кВт)	8,5
Потреба в потужності для обігріву приміщення (Вт/м <sup>2</sup> )	80
Потреба в потужності для охолодження приміщення (Вт/м <sup>2</sup> )	100
Потреба в опаленні на рік (кВт•год)	25 200
Потреба в охолодженні на рік (кВт•год)	15 300

Тепловий насос типу «вода – вода» із закритим гідротермальним теплообмінником, зануреним у водойму, має достатньо великий коефіцієнт перетворення (КОП), який дорівнює 3,5. Тобто на один кіловат затраченої електричної енергії ГідроТНС може отримати до трьох із половиною кіловат теплової енергії.

Оскільки в ГідроТНС можливе пряме охолодження, кількість холоду, що постачається з відритої водойми, еквівалентна потребі будівлі

в охолодженні. Як наслідок, розглянута система ГеоТНС має коефіцієнт енергетичного балансу між опаленням та охолодженням 0,25.

Параметри, що використовуються для визначення капітальних витрат ГідроТНС, не є специфічними для конкретного місця, а це означає, що вони мають значну варіабельність. Деякі витрати на компоненти, такі як витрати на трубу, метал та фітинги, із яких складається теплообмінник, узяті з літературних джерел, інші з використанням каталогів. У цьому разі точний і детермінований розрахунок капітальних витрат не є можливим. Таким чином, доцільно застосувати моделювання за методом Монте-Карло, який із великою кількістю варіацій дає змогу кількісно оцінити невизначеність кожного параметра. Для кожного параметра використовується симетричний трикутний розподіл, обмежений мінімальним, середнім та максимальним значенням. Найбільш вірогідним значенням є середнє, тоді як до мінімального та максимального значень імовірність безперервно зменшується. У даній симуляції мінімальні та максимальні значення є найкращим (най дешевшим) та найгіршим (найдорожчим) сценаріями. Окрім того, аналіз чутливості визначає компоненти, що мають найбільший вплив на капітальні витрати. Аналіз чутливості дає уявлення про структуру інвестиції та визначає вплив її невизначеності [23].

У табл. 2 наведено підсумкові дані мінімального, середнього та максимального значень для кожного компонента ГідроТНС, що були визначені за методом Монте-Карло та аналізу чутливості.

Витрати, пов'язані з експлуатацією, складаються з витрат на технічне обслуговування  $M$  та заміну  $R$  компонентів протягом терміну служби ГеоТНС.

Витрати на електроенергію  $EC$  є специфічними витратами, тоді як  $COP_{HP}$  є загальним значенням із довідкових джерел. Витрати на опалення складаються з витрат на електроенергію  $EC$  для роботи теплових та циркуляційних насосів. Для прямого охолодження використання теплових насосів не потрібне, тому витрати на електроенергію становлять лише витрати  $EC$  на живлення циркуляційних насосів. Витрати на технічне обслуговування визначаються як певний відсоток від вартості ГідроТНС. Період спостереження визначено як 10 років, однак деякі компоненти, такі як циркуляційні насоси, можуть мати менший термін служби і повинні бути замінені протягом періоду експлуатації.

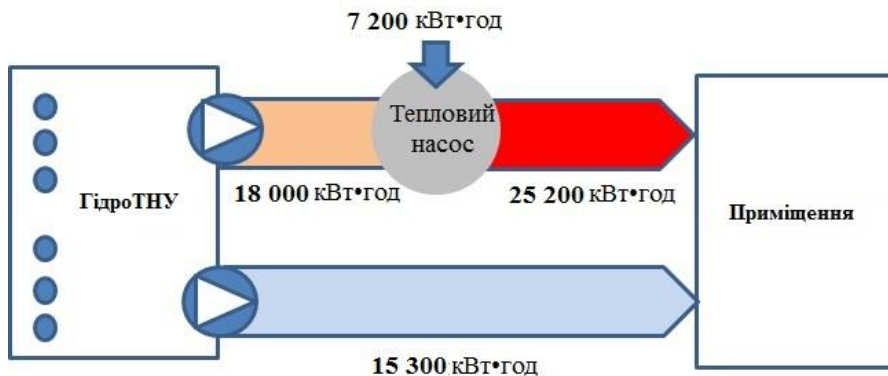


Рис. 6. Потоки енергії розглянутої системи ГеоТНС для опалення та охолодження

Таблиця 2

Вхідні параметри для розрахунку поточних витрат ГідроТНС

Параметр	Мін	Середній	Макс
**COP теплового насосу (COP <sub>HP</sub> )	3	4	5
*Витрати на електроенергію ЕС (грн/кВт*год) (транспортування та розподіл)	8	10	12
**Технічне обслуговування М (%)		4	
**Період опалення t <sub>н</sub> (год)	1557	1800	2043
**Період охолодження t <sub>с</sub> (год)	1557	1800	2043

\* Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: <https://www.nerc.gov.ua>; \*\* International Energy Agency (2007); Sommer et al. (2015) [20; 21]

Як референтна технологія для опалення будівлі розглядаються витрати на встановлення автономного електричного кола відповідної потужності. Вартість капітальних витрат складатиметься з вартості обладнання та витрат на його монтаж. Поточні витрати залежатимуть від витрат на електричну енергію, технічне обслуговування та заміну компонентів.

Також як референтна технологія для охолодження будівлі розглядається система з використанням чиллерів.

Результат моделювання методом Монте-Карло капітальних витрат на систему ГідроТНС представлено на рис. 7.

Основний фактор витрат пов'язаний із підводною частиною системи, що складається труб теплообмінників – 39% та витратами на тепловий насос і його монтаж – 35%, разом вони становить 75% від загальних капітальних витрат. Надземна частина системи ГідроТНС включає інтеграцію у будівлю опалювальних пристроїв (фанкойлів) теплопункту та мережі і становить 25% капітальних витрат (рис. 7а).

В обох системах найбільша частка загальних витрат припадає на опалення будівлі. Під час роботи ГідроТНС на охолодження теплові насоси

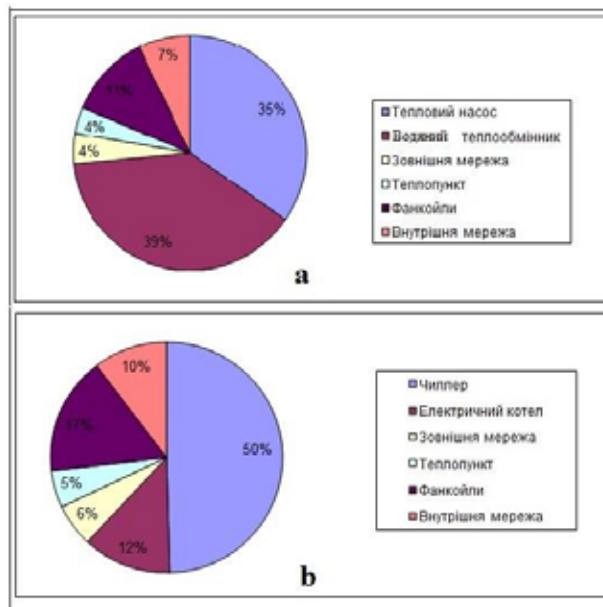


Рис. 7. Співвідношення капітальних витрат на: а – ГідроТНС; б – референтну систему

не використовуються, оскільки охолодження відбувається безпосередньо теплоносієм, що подається зі свердловини з температурою у діапазоні 10–15°C. Для референтної системи охолодження

відбувається з використанням повітряних чиллерів. Спільне в системах те, що теплові насоси як чиллери та електричні котли працюють від електроенергії. Споживання електроенергії тепловим насосом визначається його COP (коефіцієнтом перетворення), який є найбільш важливим параметром економічної ефективності системи ГідроТНС.

На рис. 8 наведено результати розрахунку окупності ГідроТНС порівняно з референтною технологією. Аналітика проводиться для ГідроТНС, що працює як гібридна система, а також тільки для цілей охолодження та опалення. Початком інвестицій є нульовий рік. Орієнтовна вартість капітальних витрат на референтну технологію становить 350 тис грн, що приблизно на 20% нижче, ніж капітальні витрати на систему ГідроТНС.

Упровадження ГідроТНС потенційно призводить до середньої економії під час використання на опалення взимку та охолодження влітку 250 тис грн порівняно з базовою технологією. Середній показник COP для підземної установки ГеоТНС становить 3,5. Незважаючи на вищі капітальні витрати, очікувана NPV гібридної ГідроТНС становить 2,0 млн грн через 10 років (рис. 4). Таким чином, інвестиції у систему АТЭС оцінюються досить позитивно порівняно з базовою технологією. Завдяки меншому споживанню енергії потенційний середній термін окупності досягає 2,2 роки. Основною причиною економічної ефективності системи ГідроТНС є пряме охолодження влітку, яке є найдешевшим варіантом постачання. Таким чином, система ГідроТНС є найбільш придатною для будівель із великим попитом на охолодження, таких як лабораторії, лікарні або центри обробки даних.

З урахуванням вище наведених експериментально та аналітично отриманих даних доцільно під час проектування гідротермальних теплонасосних систем для забезпечення техніко-економічної привабливості даних систем звернути увагу на зменшення матеріалоемності конструкції гідротермального теплообмінника та технологічність його монтажу. У першому випадку ми вирішуємо питання зменшення вартості системи, у другому – зменшуємо вартість робіт за інсталяції.

Автором запропоновано два технічні рішення, які відповідають даним умовам.

Відповідно до Патенту України [23], запропонована «Автономна гідротермальна теплонасосна система».

В основу моделі поставлене завдання створення системи відбору тепла від низькотемпературного гідротермального джерела енергії, що дасть змогу забезпечити практичну можливість реалізації високоефективної теплонасосної системи отримання теплової енергії, яка була б автономною, максимально зручною під час проведення монтажних робіт, забезпечувала б можливість оперативного демонтажу та переміщення до нового місця дислокації та була при цьому мінімально уразливою до механічних ушкоджень.

Поставлене завдання досягається тим, що автономна гідротермальна теплонасосна система містить тепловий насос із пристроєм автономного живлення та зовнішній циркуляційний контур для відбору низькопотенційної теплової енергії від води відкритої водойми, що складається з теплообмінника, функціонально пов'язаного із циркуляційним насосом для прокачування води між водоймою та тепловим насосом, при цьому вода з водойми подається до теплообмінника та повертається назад по трубах, укладених у водойму та

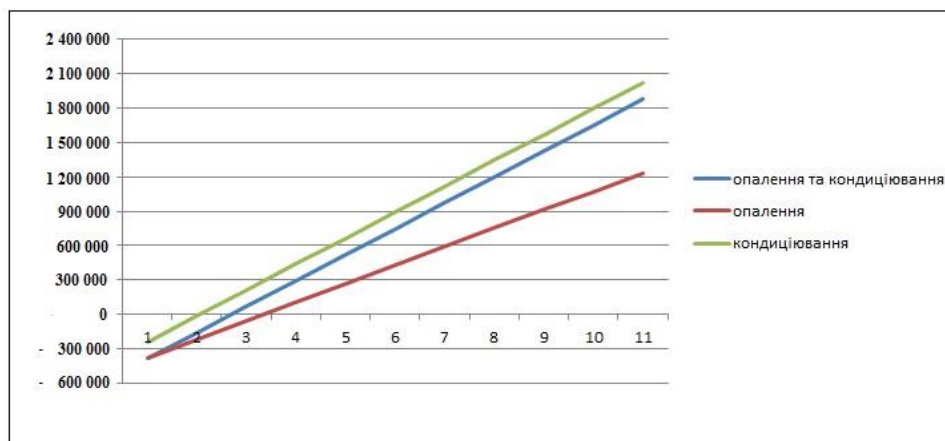


Рис. 8. Графік окупності ГідроТНС під час роботи в різних режимах



обладнаних грузилами-фільтрами, кожна труба подачі води до водойми автономної гідротермальної теплонасосної системи пов'язана з гребінкою відведення води з теплового насоса, а кожна труба відведення води з водойми пов'язана з гребінкою подачі води до теплового насоса.

Завдяки прямому забору води з відкритої водойми, що є джерелом низькопотенційної теплової енергії, підвищується ефективність гідротермальної теплонасосної системи, забезпечується максимальний термодинамічний потенціал енергії, отриманої з водойми.

Окрім того, завдяки тому, що відповідно до запропонованої корисної моделі компресор теплового насоса та циркуляційний насос функціонально поєднані з пристроєм автономного живлення, забезпечується автономність роботи системи.

Також завдяки тому, що для забору води для роботи теплового насоса використовуються труби з грузилами-фільтрами, зануреними у відкриту водойму, забезпечується зручність та технологічність під час проведення монтажних робіт.

Окрім того, завдяки тому, що зовнішній циркуляційний контур складається з невеликої кількості функціонально пов'язаних елементів, а як теплообмінник для роботи теплового насоса використовується природня відкрита водойма, ми отримуємо нову якість, яка полягає у можливості оперативного демонтажу системи та переміщення її до нового місця дислокації та бути при цьому мінімально уразливою до механічних ушкоджень.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням (рис. 9), на якому зображено автономну гідротермальну теплонасосну систему.

Технічний результат винаходу полягає у: підвищенні ефективності системи завдяки прямому забору води з відкритої водойми, що є джерелом низькопотенційної енергії; технологічності під час проведення монтажних робіт завдяки тому, що для забору води для роботи теплового насоса використовуються труби з грузилами-фільтрами, зануреними у відкриту водойму; можливості оперативного демонтажу системи та переміщення її до нового місця дислокації та мінімальної уразливості до механічних ушкоджень завдяки тому, що зовнішній циркуляційний контур складається з невеликої кількості функціонально пов'язаних елементів, а як теплообмінник для роботи теплового насоса використовується природня відкрита водойма.

Відповідно до Патенту України [24], запропонована «Мобільна гідротермальна модульна теплонасосна система».

В основу корисної моделі поставлене завдання створення системи відбору тепла від низькотемпературного гідротермального джерела енергії, що дасть змогу забезпечити практичну можливість реалізації високоефективної теплонасосної системи отримання теплової енергії, яка була б максимально технологічною та зручною під час проведення монтажних робіт, забезпечувала б можливість оперативного демонтажу та переміщення до нового місця дислокації та була при цьому мінімально уразливою до механічних ушкоджень.

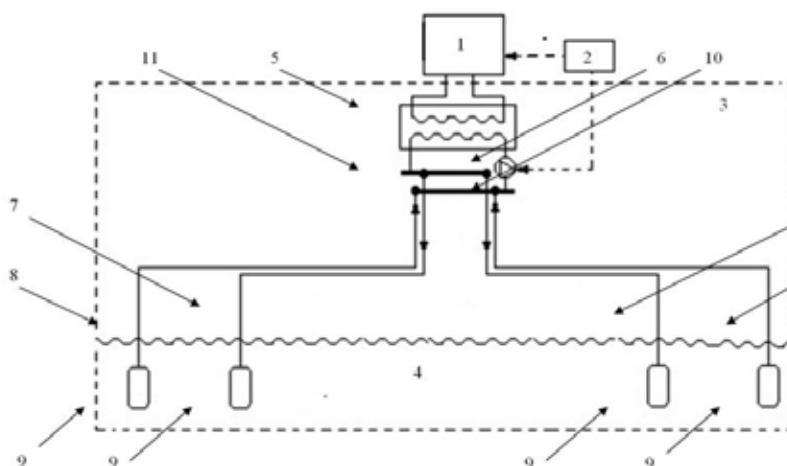


Рис. 9. Автономна гідротермальну теплонасосна система (Патент № 151298 Україна):  
 1 – гребінка відведення води з теплового насоса; 2 – теплообмінник; 3 – тепловий насос;  
 4 – пристрій автономного живлення; 5 – циркуляційний насос; 6 – гребінка подачі води до теплового насоса; 7 – труба подачі води до водойми; 8 – труба відведення води з водойми;  
 9 – відкрита водойма; 10 – грузило з фільтрами

Поставлене завдання досягається тим, що мобільна гідротермальна модульна теплонасосна система містить тепловий насос та зовнішній циркуляційний контур, що складається з теплообмінника і циркуляційного насоса для прокачування теплоносія від зовнішнього джерела низькопотенційної теплоти, зовнішній циркуляційний контур функціонально пов'язаний із контуром теплового насосу, мобільна гідротермальна модульна теплонасосна система містить теплообмінник, який складається з декількох функціонально пов'язаних водяних колекторів, виготовлених з еластичного матеріалу у вигляді «надувного матрацу», прошитого таким чином, що його внутрішній простір являє собою гнучкий канал, який кільцями проходить по всій площині даної конструкції, кожний водяний колектор на вході і виході з гнучкого каналу має з'єднувальні клапани, якими декілька водяних колекторів функціонально поєднані у теплообмінник, котрий занурено у водне середовище, при цьому теплообмінник мобільної гідротермальної теплонасосної системи одним кінцем пов'язаний із трубою відведення теплоносія з теплового насосу у водяні колектори, а другим кінцем – із трубою подачі теплоносія в тепловий насос із водяних колекторів.

Завдяки можливості поєднання водяних колекторів у різній конфігурації залежно від типу, форми, площі та глибини відкритої водойми забезпечується повне обтікання теплообмінної площі водяного колектора водою, що є дже-

релом низькопотенційної енергії, завдяки чому підвищується ефективність теплообмінника, забезпечується максимальний термодинамічний потенціал отриманої з водою низькопотенційної енергії.

Також завдяки тому, що теплообмінник мобільної гідротермальної модульної теплонасосної системи складається з декількох функціонально пов'язаних водяних колекторів, а кожний водяний колектор на вході і виході мають з'єднувальні клапани, якими декілька водяних колекторів функціонально поєднані, забезпечується висока технологічність виготовлення та зручність під час проведення монтажних робіт.

Окрім того, завдяки тому, що теплообмінник мобільної гідротермальної модульної теплонасосної системи складається з декількох функціонально пов'язаних водяних колекторів, виготовлених з еластичного матеріалу у вигляді «надувного матрацу», у який як теплоносій під час розгортання накачується, а під час згортання видаляється вода, ми отримуємо нову якість, яка полягає у можливості оперативного демонтажу системи та переміщення її до нового місця дислокації, а можливістю резервування елементів водяного колектора забезпечується мінімальна уразливість системи до механічних ушкоджень.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням (рис. 10), де схематично зображено мобільну гідротермальну модульну теплонасосну систему та її складові частини.

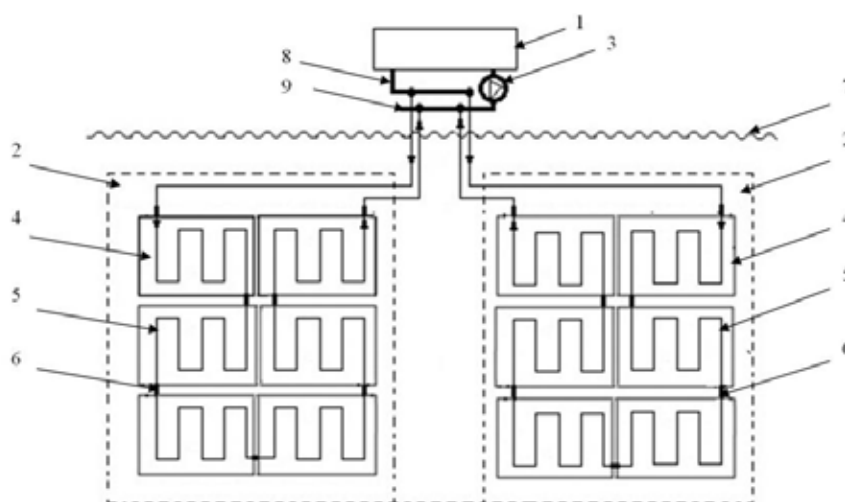


Рис. 10. Структурна схема мобільної гідротермальної модульної теплонасосної системи (Патент № 151298 Україна): 1 – тепловий насос; 2 – теплообмінник; 3 – циркуляційний насос; 4 – водяний колектор; 5 – внутрішній простір; 6 – з'єднувальні клапани; 7 – відкрита водойма; 8 – труба відведення теплоносія; 9 – труба подачі теплоносія

Температура води на дні водойми є плюсовою протягом року та становить у середньому від  $+4^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  залежно від пори року. Гідротермальна теплонасосна система водяним колектором, зануреним у водне середовище, збирає низькопотенційну енергію води та подає її до теплового насосу, де вона перетворюється на енергію з температурою, придатною для опалення та гарячого водопостачання.

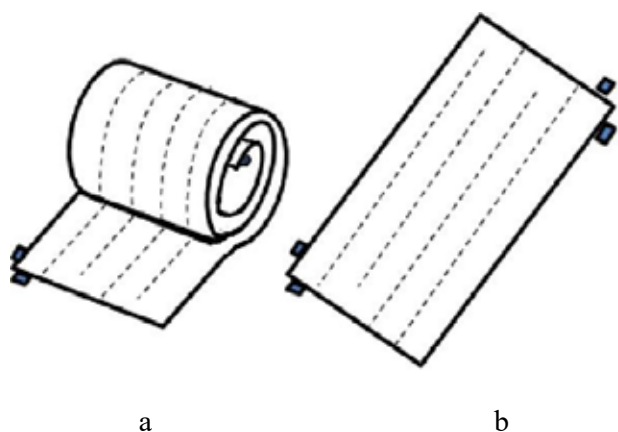


Рис. 11. Один модуль водяного колектора мобільної гідротермальної модульної теплонасосної системи: а – у згорнутому вигляді; б – у розгорнутому вигляді

Модулі водяного колектора (рис. 11) розгортаються та функціонально поєднуються один з одним з'єднувальними клапанами б у необхідну конфігурацію (рис. 12), яка вибирається залежно від типу, форми, площі та глибини відкритої

водойми та необхідної кількості, котра відповідає необхідній потужності мобільної гідротермальної модульної теплонасосної, після чого конструктивно поєднується із циркуляційним насосом 3 та тепловим насосом 1 і занурюється у відкриту водойму 7 шляхом накачування води у гнучкі канали 5 водяних колекторів 4.

Технічний результат винаходу полягає у: підвищенні ефективності системи завдяки можливості поєднання водяних колекторів у різній конфігурації, чим забезпечується повне обтікання теплообмінної площі водяного колектора водою, що є джерелом низькопотенційної енергії; технологічності виготовлення водяного теплообмінника та зручності під час проведення монтажних робіт унаслідок того, що теплообмінник складається з декількох функціонально пов'язаних водяних колекторів, а кожний водяний колектор на вході і виході має з'єднувальні клапани, якими декілька водяних колекторів функціонально поєднані; забезпеченні можливості оперативного демонтажу та переміщення до нового місця дислокації та мінімальній уразливості до механічних ушкоджень за рахунок того, що теплообмінник складається з декількох функціонально пов'язаних водяних колекторів, виготовлених з еластичного матеріалу, у якому як теплоносій під час розгортання накачується, а під час згортання видаляється вода.

**Висновки.** Експериментально та теоретично підтверджено, що приповерхневі води є ефективним джерелом низькопотенційного тепла для теплових насосів, оскільки їхня температура протягом усього року знаходиться в діапазоні від  $+4$

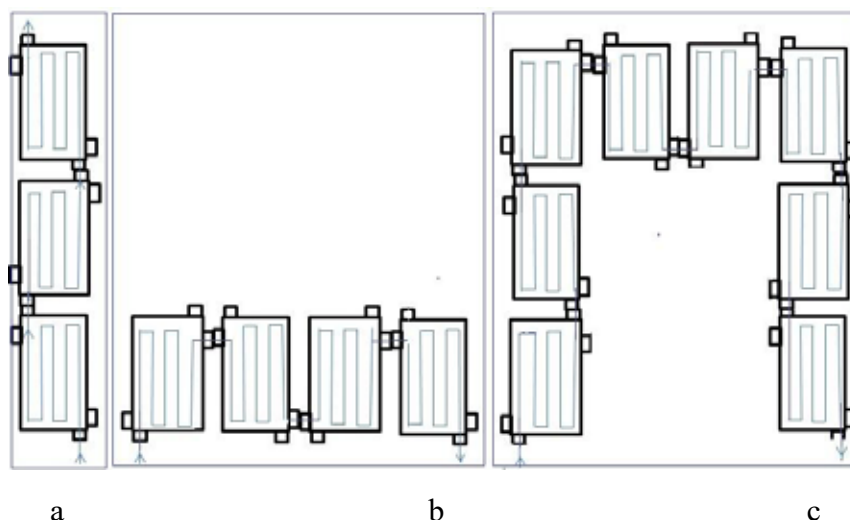


Рис. 12. Варіанти складання теплообмінника з елементів водяного колектора: а – у довжину; б – у ширину; с – хаотичним способом

до +25°C. А коефіцієнт перетворення гідротермальної системи становить близько 3,5.

Обґрунтовано, що наявні гідротермальні системи не завжди адаптовані до умов експлуатації та місця розташування об'єкта, актуальним залишається питання наукового підходу до розроблення технологічної конструкції гідротермального колектора, методології оптимального його розміщення й визначення ефективності залежно від умов експлуатації.

Аналітично доведено, що строк окупності гідротермальної теплонасосної системи закритого типу становить 2,2 роки під час роботи на протяжності року як у режимі опалення взимку, так і охолодження влітку, а під час використання системи тільки на охолодження (без теплового насосу) строк окупності становить один рік. Установлено, що основний фактор витрат пов'язаний із підводною частиною системи, що складається з труб теплообмінників – 39%, та витратами на тепловий насос та його монтаж – 35%, разом вони становлять 75% від загальних капітальних витрат.

Обґрунтовано, що під час проєктування гідротермальних теплонасосних установок для забезпечення техніко-економічної привабливості даних систем треба звернути увагу на зменшення матеріалоемності конструкції гідротермального теплообмінника та технологічність його монтажу. У першому випадку ми вирішуємо питання зменшення вартості системи, у другому – зменшуємо вартість робіт за інсталяції.

Доведено, що для ефективного використання відкритої водойми як природного джерела теплової енергії необхідне проведення попередніх гідрогеологічних досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання : навчальний посібник. Київ : КПІ, 2013. 312 с.
2. Долінський А.А., Драганов Б.Х. Теплові насоси у системі теплопостачання будівель. *Промислова теплотехніка*. 2008. № 6. С. 71–83.
3. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії : монографія. Київ : ІВЕ НАН України, 2020. 354 с.
4. Dincer I., Rosen M. Thermal energy storage: systems and applications. 2nd ed. London : Wiley, 2011. 315 p.
5. Kalaiselvam S. Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications : 1st ed. / S. Kalaiselvam, R. Parameshwaran. Amsterdam : Elsevier AP, 2014. 233 p.
6. Andersson O., Ekkestubbe J., Ekdahl A. UTES (Underground Thermal Energy Storage) – applications and market development in Sweden. *Energy Power Eng.* 2013. № 7. P. 669–678.
7. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review / P. Bayer et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. № 16. P. 1256–1267. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>.
8. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Ніколаєвська Н.В., Добровольський М.П. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі України. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4(63). С. 80–88. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88).
9. Зур'ян О.В., Олійніченко В.Г. Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 40–46. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>.
10. Схемні рішення оснащення енергоефективного будинку системою теплозабезпечення / Б.І. Басок та ін. *Промислова теплотехніка*. 2013. № 1. С. 42–48.
11. Гершкович В.Ф. Особливості проєктування систем теплопостачання будівель із тепловими насосами : монографія. Київ : Українська академія архітектури, 2009. 160 с.
12. Кулик М.М., Дубовський С.В. Основні напрями та пріоритетні заходи зі зменшення обсягів використання природного газу в економіці і соціальній сфері України. *Системні дослідження в енергетиці*. 2009. № 1(19). С. 7–15.
13. Морозов Ю.П., Барило А.А., Чалаєв Д.М., Добровольський М.П. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для теплої холодопостачання. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2. С. 70–78. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57)).
14. Zurian O.V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech.* Varna. Bulgaria. 2019. P. 83–90. URL: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>.
15. Барило А.А. Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України. *Відновлювана енергетика*. 2020. № 1(60). С. 74–84. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).74-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).74-85).
16. Малкін Е.С., Кулінко Є.О. Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплозапобігання*. 2014. № 17. С. 63–69.
17. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Олійніченко В.Г., Величко В.В. Експериментальне дослідження добового акумулявання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 3. С. 67–77. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).67-77).
18. Зур'ян О.В. Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної сис-

теми. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 4(67). С. 77–89. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89).

19. Гошовський С.В., Зур'ян О.В. Екологічно безпечне використання гідроенергетичного потенціалу гідротермальними енергетичними системами України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2019. № 4(87). С. 67–74. URL: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.10>.

20. International Energy Agency Renewables for heating and cooling: untapped potential. Renewable energy technology deployment. 2023. URL: <https://www.witteveenbos.com/news/geothermal-energys-untapped-potential/>.

21. Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage / W. Sommer et al. *Appl Energy*.

2015. № 137. P. 322–337. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.019>.

22. Blohm H., Lüder K., Schaefer C. Investment: weak point analysis of the investment area and investment calculation. 9th ed. Munich : Vahlen, 1995. 346 p.

23. Зур'ян О.В. Патент № 151298 Україна, F24H 4/02 (2022.01), F24H 7/02 (2022.01), F24T 50/00. Автономна гідротермальна теплонасосна система. № u202200471 ; заяв. 04.02.2022; опубл. 29.06.2022; Бюл. № 26/2022.

24. Зур'ян О.В. Патент № 151299 Україна, F24H 4/02 (2022.01), F24H 7/02 (2022.01), F24T 50/00. Мобільна гідротермальна модульна теплонасосна система. № u202200472 ; заяв. 04.02.2022; опубл. 29.06.2022; Бюл. № 26/2022.

## TECHNICAL AND ECONOMIC ADVANTAGES OF USING OPEN AND MODULAR HYDROTHERMAL HEAT PUMP SYSTEMS

**Oleksii Zurian**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Research

Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine, 20A Hnata Khotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094, alexey\_zuryan@ukr.net

**ORCID: 0000-0002-2391-1611**

The paper presents data on the efficiency of using renewable low-potential ground energy for the operation of geothermal heat pump systems, which are already widely used in environmentally safe and economically profitable energy systems. At the same time, the use of low-potential water energy of open reservoirs in hydrothermal heat pump systems is not yet widely used. It is substantiated that the existing hydrothermal systems are not always adapted to the operating conditions and location of the object, the issue of a scientific approach to the development of the technological design of the hydrothermal collector, the methodology of its optimal placement and determining the efficiency depending on the operating conditions remains relevant. The scientific novelty of the new technological approach is the technical and economic substantiation of the feasibility of using a water collector of a special design, which has a modular structure and consists of several functionally connected water probes. The work presents the results of experimental studies of the efficiency of the hydrothermal heat pump system, where the low-potential thermal energy of water is used as a renewable primary source of thermal energy for the operation of the heat pump. The developed and constructed experimental hydrothermal heat pump system is presented, which consists of a heat pump and a heat exchanger immersed in a reservoir, work was performed on the installation of combs for the supply and return of the heat carrier to the heat exchanger, through which the circulation of the propylene glycol solution from the water collector to the heat pump is ensured. Based on the experimentally obtained data, the conversion factor of this system was determined and the payback period was calculated. It has been proven that 40% of the cost of a hydrothermal system is accounted for by the water collector and installation work for its installation. Proposed and scientifically based innovative design solutions for low-potential water energy extraction systems and its conversion systems for heating, air conditioning, hot water supply and provision technological needs of consumers both for autonomous operation in field conditions and technogenically loaded urban systems.

**Key words:** hydrosphere, open reservoir, heat pump, hydrothermal system, energy efficiency.

### REFERENCES

1. Bezrodnyi M.K., Pukhovyi I.I., Kutra D.S. (2013). *Теплові насоси та їх використання* [Heat pumps and their uses]. Kyiv: KPI (in Ukrainian)

2. Dolinsky A.A. & Draganov B.H. (2008). *Теплові насоси у системі тепlopостачання будівель* [Heat pumps in the heat supply system of buildings]. *Промислова теплотехніка – Industrial heat engineering*, 6, 71–83. (in Ukrainian)

3. Kudrya S.O. (2020) *Vidnovliuvani dzherela enerhii* [Renewable energy sources]. Kyiv : IVE NAS of Ukraine (in Ukrainian)

4. Dincer I. & Rosen M. (2011). *Thermal energy storage: systems and applications*. London : Wiley

5. Kalaiselvam S. & Parameshwaran R. (2014). *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications*. Amsterdam : Elsevier AP

6. Andersson O., Ekkestubbe J., Ekdahl A. (2013). *UTES (Underground Thermal Energy Storage) – applications and market development in Sweden*. *Energy Power Eng*, 7, 669–678.

7. Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach L., Blum P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>
8. Morozov Y.P., Chalaev D.M., Nikolayevskaya N.V., Dobrovolsky M.P. (2019). Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplovoho potentsialu dovkillia ta verkhnikh shariv Zemli Ukrainy [Evaluation of the efficiency of using the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth of Ukraine]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable energy*, 4, 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88) (in Ukrainian)
9. Zurian O.V. & Oliynychenko V.G. (2021). Hidrotermalna systema otrymannia teplovoi enerhii, fizychni protsesy, efektyvnist [Hydrothermal system of heat energy production, physical processes, efficiency]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 4, 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46> (in Ukrainian)
10. Basok B.I., Nedbaylo O.M., Tkachekno M.V., Bozhko I.K., Novitskaya M.P. (2013). Skhemni rishennia osnashchennia enerhoefektyvnogo budynku systemoiu teplozabezpechennia [Schematic solutions for equipping an energy-efficient building with a heat supply system]. *Promyslova teplotekhnika – Industrial heat engineering*, 1, 42–48. (in Ukrainian)
11. Gershkovich V.F. (2009). Osoblyvosti proektuvannia system teplopostachannia budivel iz teplovymy nasosamy [Features of design of heat supply systems Design features of heat supply systems of buildings with heat pumps]. Kyiv : Ukrainian Academy of Architecture (in Ukrainian)
12. Kulyk M.M. & Dubovsky S.V. (2009). Osnovni napriamy ta priorytetni zakhody zi zmenshennia obsiahiv vykorystannia pryrodnoho hazu v ekonomitsi i sotsialnii sferi Ukrainy [The main directions and priority measures to reduce the use of natural gas in the economy and social sphere of Ukraine]. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi – System Studies in Energy*, 1, 7–15. (in Ukrainian)
13. Morozov Yu.P., Barilo A.A., Chalayev D.M., Dobrovolskyj M.P. (2019). Enerhetychna efektyvnist vykorystannia pershykh vid poverkhni vodonosnykh horizontiv dlia teplo- i kholodopostachannia [Energy efficiency of using the first aquifers from the surface for heat and cold supply] *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable Energy*, 2, 70–78. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57)) (in Ukrainian)
14. Zurian O.V. (2019). Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech. Varna. Bulgaria.*, 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>
15. Barylo A.A. (2020). Analiz hidroheolohichnykh i heotermichnykh kharakterystyk heotermalnykh ob'ektiv Ukrainy [Analysis of hydrogeological and geothermal characteristics of geothermal objects of Ukraine]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable Energy*, 1, 74–84. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).74-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).74-85) (in Ukrainian)
16. Malkin E.S. & Kulinko Ye.O. (2014). Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut pry poverkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora [Prospects and aspects of application of heat and cold supply systems that use near-surface layers of water as a heat accumulator]. *Ventyliatsiia, osvittleniia ta teplozazopostachannia – Ventilation, lighting and gas supply*, 17, 63–69. [in Ukrainian]
17. Morozov Yu.P., Chalayev D.M., Olijnichenko V.G., Velychko V.V. (2019). Eksperymentalne doslidzhennia dobovoho akumuluvannia kholodu shliakhom vykorystannia vody pidzemnykh horizontiv m. Kyieva [Experimental study of daily cold accumulation through the use of water from the underground horizons of Kyiv]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable Energy*, 3, 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77) [in Ukrainian]
18. Zurian O.V. (2021). Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system [Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system]. *Vidnovliuvana enerhetyka – Renewable Energy*, 4, 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-058.2021.4(67).77-89) (in Ukrainian)
19. Hoshovsky S.V., Zurian O.V. (2019). Environmentally safe use of hydropower potential by hydrothermal energy systems in Ukraine. *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. – geology*, 4, 67–74. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.10>
20. International Energy Agency Renewables for heating and cooling: untapped potential. Renewable energy technology deployment. 2023. Website. URL: <https://www.witteveenbos.com/news/geothermal-energys-untapped-potential/> (date of application 21.09.2023).
21. Sommer W., Valstar J., Leusbrock I., Grotenhuis T., Rijnaarts H. (2015). Optimization and spatial pattern of large-scale aquifer thermal energy storage. *Appl Energy*, 137, 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.019>.
22. Blohm H., Lüder K., Schaefer C. (1995). Investment: weak point analysis of the investment area and investment calculation. 9th ed. Munich: Vahlen. 1995. (German)
23. Zurian O.V. (2022). Patent № 151298 Ukraine, F24H 4/02 (2022.01), F24H 7/02 (2022.01), F24T 50/00. Autonomous hydrothermal heat pump system. / applicant and right holder O.V. Zurian, № u202200471; statement 02/04/2022; published 06/29/2022; Bul. No. 26/2022.
24. Zurian O.V. (2022). Patent № 151299 Ukraine, F24H 4/02 (2022.01), F24H 7/02 (2022.01), F24T 50/00. Mobile hydrothermal modular heat pump system. / applicant and right holder O.V. Zurian, № u202200472; statement 02/04/2022; published 06/29/2022; Bul. No. 26/2022.

Стаття надійшла 03.08.2023