

УДК 556.506; 620.92; 620.987
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.13>

О. Зур'ян, канд. техн. наук, наук. співроб.,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
А. Баріло, наук. співроб.,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Г. Хоткевича, 20-а, м. Київ, 02094, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК ЗАКРИТОГО ТА ВІДКРИТОГО ТИПУ З РІЗНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОЇ ЕНЕРГІЇ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Присвячено новому напрямку використання вод верхніх водоносних горизонтів і відкритих водоймищ для тепло- і холодопостачання житлових і громадських будівель та споруд. Наведено теоретичний аналіз технологій побудови та особливостей використання природних акумуляторів теплової енергії у водоносних горизонтах та відкритих водоймах. Описано загальні схеми побудови гідротермальних теплонасосних систем закритого та відкритого типу. Представлено розроблену і сконструйовану в Інституті відновлюваної енергетики НАНУ гідротермальну експериментальну теплонасосну систему, яка складається з теплового насоса та двох свердловин, завглибишки 49,5 м та 57,5 м, через які забезпечується циркуляція води між підземним горизонтом та тепловим насосом. Проведено аналіз геолого-гідрогеологічних умов ділянки дослідження. Описано особливості формування запасів підземних вод продуктивного горизонту. Визначено подальші напрями проведення гідрогеологічних спостережень.

Науково обґрунтовано ефективність гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу. Описано методику проведення досліджень. Наведено характеристики вимірювального обладнання, встановленого на гідротермальній системі, і програмного забезпечення, яке використовувалося для архівації та візуалізації даних, отриманих у процесі проведення науково-дослідницької роботи.

Наведено результати проведених експериментальних досліджень. Проведено порівняльний аналіз ефективності та інвестиційної привабливості гідротермальної системи відкритого та закритого типу, де як відновлюване первинне джерело теплової енергії для роботи теплового насоса використовується низькопотенціальна теплова енергія води.

Встановлено, що використання відновлюваної низькопотенціальної енергії ґрунту для роботи геотермальних енергетичних систем широко застосовується в екологічно безпечних та економічно вигідних енергетичних системах. Разом з тим використання гідроенергетичного потенціалу в гідротермальних теплонасосних системах не має широкого застосування незважаючи на високі технічні та економічні показники. Доведено, що наявні гідротермальні теплонасосні системи не завжди адаптовані до умов експлуатації та місця розташування об'єкта. Відсутні методики проєктування гідротермальних теплонасосних систем відкритого типу, методики проведення попередніх гідрогеологічних досліджень району, запланованого для монтажу цих систем, та методики розрахунку параметрів акумуляуючого середовища.

Отримані в ході дослідження дані мають важливе наукове і прикладне значення при проєктуванні гідротермальних теплонасосних систем. Крім того, мають перспективу подальші дослідження можливостей та ефективності використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплоти для стабілізації генерування енергії від відновлюваних джерел незалежно від кліматичних умов і пори року.

Ключові слова: тепловий насос, гідротермальна система, водоносний горизонт, низькопотенціальна енергія води.

Постановка проблеми. Використання поверхневих вод відкритих водоймищ та верхніх водоносних горизонтів з енергетичною метою – це реальність нашого часу. Згідно з даними Всесвітнього геотермального конгресу, на початок 2020 р. встановлена теплова потужність геотермальних теплонасосних установок (ТНУ), які як первинне джерело енергії використовують теплову енергію повітря, ґрунту, підземних і поверхневих вод, значно перевищила потужності традиційних глибинних геотермальних теплових станцій і досягла позначки 78 ГВт. На сьогодні у світі існує понад 6,5 млн таких установок. Більшість з них малої потужності (середня – 12 кВт) і використовується для теплопостачання і кондиціювання індивідуальних житлових будівель, рідше – інституційних і комерційних установ (Lund and Aniko, 2021).

В Україні в останні роки також спостерігається стрімке зростання впровадження в системи теплопостачання геотермальних теплових насосів, що використовують низькопотенціальні джерела енергії, однак статистичний облік таких установок практично не ведеться. Тому на сьогодні в країні достеменно невідомий ні рівень сумарної встановленої потужності, ні його поділ за джерелами низькопотенціальної теплоти. Однак, згідно з оцінюванням, проведеним на основі даних фіскального обліку митної служби нашої країни щодо імпорту теплових насосів та їх комплектуючих, сумарна теплова потужність теплових насосів, які зараз використовуються в Україні, приблизно дорівнює 1800 МВт (Кудря, 2020).

Аналіз статистичних даних показує, що за період з 2004 по 2020 р. витрати на сплату комунальних послуг (без врахування плати за обслуговування будинку та прибудинкової території) збільшилися більше ніж в 30 разів. Зрозуміло, що така ситуація викликає пошук нових альтернативних методів опалення та гарячого водопостачання, одним з яких є застосування теплонасосних установок, що використовують низькопотенціальні геотермальні джерела енергії. Особливо це стосується споживачів, що мають індивідуальну систему теплопостачання.

Зростанню впровадження теплонасосних технологій у систему індивідуального теплопостачання також сприяє відсутність необхідності землевласникам і землекористувачам мати спеціальні дозволи та гірничі відводи на відбір підземних вод на своїх ділянках за умови, що обсяги видобування підземних вод не перевищують 300 м³/доб. (Стаття 23 Кодексу України про надра).

Тому пошук перспективних шляхів розвитку техніки та технологій на основі використання енергії відновлюваних джерел, у т. ч. низькопотенціальної геотермальної енергії, є однією з проблем, розв'язання якої в Україні дасть гарантію енергетичної безпеки та незалежності держави (Кудря, 2004).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки питанням досвіду використання теплонасосних систем в Україні та світі, де як первинне джерело енергії використовується низькопотенціальна енергія приповерхневих шарів Землі, присвячена велика кількість

© Зур'ян О., Баріло А., 2022

досліджень. Аналіз ефективності різних типів теплонасосних систем наведено в роботах (Долінський та Драганов, 2008; Морозов та ін., 2017; Гошовський та Зур'ян, 2013; Попов, 2005; Laloui et al., 2006; Елістратов, 2011; Яценко, 2017). Сукупність математичних моделей, що дозволяють розраховувати процеси тривалого акумулювання теплоти в навколишньому природному середовищі з подальшим її видобуванням, наведено в монографії (Накорчевський, 2010). Ефективність застосування теплонасосних технологій, де як первинне джерело теплової енергії використовується теплота приповерхневих шарів Землі, досліджувалася в роботах (Matos et al., 2019; Deng et al., 2020; Kim and Lee, 2020; Zurian 2019; Лусак, 2020). Інноваційні конструкції геотермальних теплообмінників розроблені та описані в дослідженнях (Федянін та Карпов, 2006; Кіріченко, 2014; Гошовський та Зур'ян, 2015). У роботах (Шубенко та Кухарець, 2014; Morrison et al., 2004; Hepbasli and Kalinci, 2009) автори науково довели, що безпосередньо тепловий насос як складова частина теплонасосної системи є екологічно чистим пристроєм, основною функцією якого є переміщення низькотемпературної енергії від відновлюваного джерела до системи теплозабезпечення будівлі зі значенням температури та потужності, необхідним для споживання, та зроблено припущення, що техногенне навантаження на довкілля та екологічну небезпеку можуть нести теплофізичні процеси, що відбуваються в системі геотермальний теплообмінник – ґрунт. Перспективи використання геотермальних технологій на території Чорнобильської зони відчуження досліджено в роботі (Барилло, 2017). В останні роки розпочато активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- та холодопостачання (Малкін та Колінко, 2014; Морозов та ін., 2019). Крім того, активно проводяться дослідження щодо застосування як теплового акумулятора для роботи теплонасосної системи відкритих водойм. Є приклади ефективного використання таких гідротермальних теплонасосних систем з теплообмінниками, встановленими на дно водойми (Goshovsky and Zurian, 2013).

Виділення нерозв'язаних раніше частин проблеми. Одним з варіантів економії енергоресурсів є використання для теплопостачання низькопотенційних джерел тепла за допомогою теплових насосів. Цей метод екологічно безпечний і досить дешевий. Основна відмінність теплового насоса від інших перетворювачів відновлюваної енергії полягає в тому, що при виробництві тепла до 80 % енергії вилучається з навколишнього середовища: ґрунту, води, повітря.

Теплові насоси в холодну пору року опалюють приміщення, а в теплу пору року використовуються для охолодження повітря в будинку. У такому випадку тепло з повітря приміщень будинку забирається та передається назад у ґрунт, повітря чи у водоймище. Багатофункціональність використання є однією з найважливіших переваг теплових насосів.

Тепловий насос фактично перекачує тепло з контуру приєднаного до джерела відновлюваної енергії до контуру поєднаного з системою теплозабезпечення будівлі. Ефективність використання теплового насоса залежить від його коефіцієнта перетворення, який визначається відношенням кількості тепла, отриманого від теплового насоса, до витрат енергії для роботи компресора (приводу) теплового насоса. Цей коефіцієнт може бути від 2,5 до 5 для різних типів теплових насосів.

Однак така система має і недоліки, які визначаються суттєвою залежністю її ефективності від температури на вході у випарник та на виході з конденсатора теплового насоса. Тому на ефективність роботи теплонасосних установок передусім впливає природа первинного джерела теплової енергії та конструктивні особливості системи теплозабезпечення будівлі.

Залежно від способу відбору теплоти від первинного джерела енергії усі теплонасосні системи поділяються на:

- відкритого типу, в яких природний теплоносіє (повітря, води підземних водоносних горизонтів або поверхневих водоймищ) безпосередньо подаються до випарника теплового насоса;

- закритого типу, в яких для використання первинної низькопотенційної енергії ґрунту, поверхневих або підземних вод застосовується додатковий контур (колектор-теплообмінник), в якому циркулює холодоагент, що здійснює "відбір" теплової енергії від первинного джерела енергії та перенос її до випарника теплового насоса.

Мета дослідження. На підставі порівняльного аналізу енергетичних показників двох дієвих експериментальних теплонасосних установок закритого та відкритого типів визначити найефективніший спосіб освоєння низькопотенційних геотермальних ресурсів з урахуванням природи первинного джерела теплової енергії та конструктивних особливостей системи видобування.

Виклад основного матеріалу дослідження. На сьогодні існує ряд теплонасосних енергетичних систем, які використовують теплообмінники для забору первинної низькопотенційної теплової енергії :

1. Геотермальна теплонасосна енергетична система закритого типу з горизонтальним ґрунтовим колектором.
2. Геотермальна теплонасосна енергетична система закритого типу з вертикальним ґрунтовим колектором.
3. Гідротермальна теплонасосна система закритого типу з горизонтальним водяним колектором-теплообмінником, розміщеним на дні водойми.

Разом з тим теплообмінники, що використовуються в усіх цих системах, мають ряд недоліків, основним з яких є мала величина теплоті, що пов'язана з низькою теплопровідністю ґрунтового масиву. Залежно від складу і вологості порід питомий теплоті з одного погонного метра ґрунтового теплообмінника становить від 20 до 80 Вт/м. Відповідно, при опалювальній площі будинку 100 м², для роботи теплового насоса потрібно 3–4 теплообмінника завдовжки до 50 м. Тому в багатьох районах України вищеперелічені теплонасосні системи характеризуються малою тепловою потужністю, тобто вони придатні для невеликих систем потужністю до 30 кВт. Крім того, для забезпечення теплохолодопостачання об'єктів доцільно використовувати системи з акумуляцією теплоти.

Альтернативою таким системам може стати:

4. Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу, де як теплоносіє використовуються підземні води верхніх водоносних горизонтів, що розташовані від глибини залягання нейтрального шару (тобто поверхні постійних річних температур) до глибини 400 м.

Внаслідок відсутності поверхонь теплообміну цей тип низькопотенційних теплонасосних установок може забезпечити найкращі економічні характеристики серед підземних акумуляторів тепла. Однак такий спосіб освоєння низькопотенційного тепла ускладнюється тим, що вимагає при проектуванні системи теплопостачання враховувати гідродинамічні і теплофізичні характеристики конкретного водоносного горизонту, на основі якого така система створюється (Кіріченко, 2014).

Для проведення досліджень теплових і гідродинамічних процесів, що відбуваються в продуктивному водоносному пласті під час освоєння низькопотенційної енергії підземних вод верхніх водоносних горизонтів, в Інституті відновлюваної енергетики НАН України на прибудинковій ділянці корпусу 2, що розташований за адресою вул. Метрологічна, буд. 50, було створено Експериментальну систему видобування геотермальних джерел енергії типу ГЦС (геотермальна циркуляційна система). Експериментальна установка є теплообмінним пристроєм, який складається із: двох свердловин,

облаштованих водопідйомним обладнанням, з'єднаних трубопроводів для транспортування підземних вод та приладів контролю і вимірювання основних технологічних параметрів. Разом з тепловим насосом та приладами системи теплозабезпечення будівлі (фанкойлами, мережевими трубопроводами та циркуляційними насосами) експериментальна установка являє собою гідротермальну теплонасосну установку відкритого типу. Принципову схему дослідної установки зображено на рис. 1.

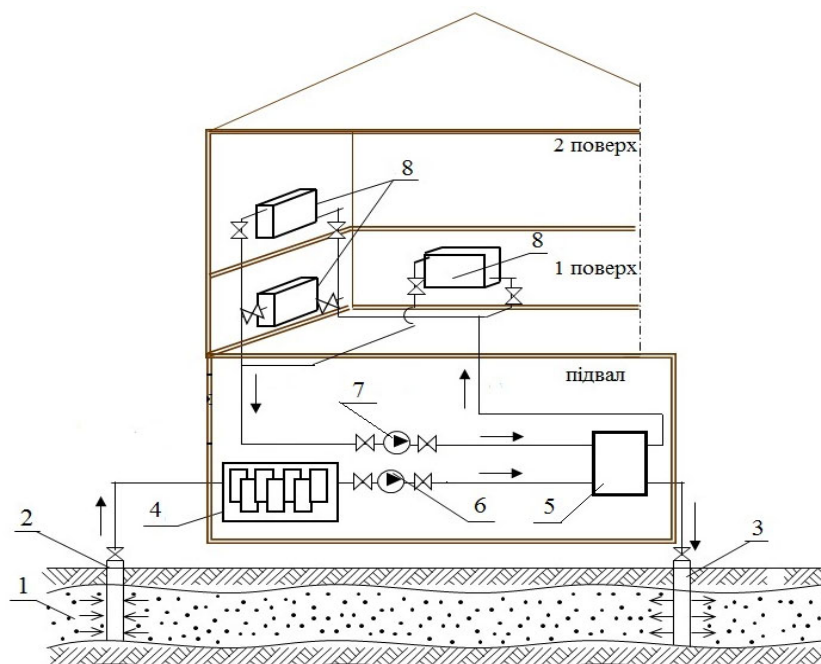


Рис. 1. Принципова схема експериментальної гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу:

1 – проникний підземний шар; 2 – видобувна свердловина; 3 – поглинальна свердловина; 4 – баки-акумулятори (7 шт.); 5 – тепловий насос; 6, 7 – циркуляційні насоси; 8 – фанкойл (3 шт.) (Морозов та ін., 2019)

Згідно з принциповою схемою експериментальна теплонасосна установка працює у двох режимах: в опалювальний сезон – для забезпечення теплом; у літній – для кондиціювання приміщень.

У режимі теплозабезпечення підземна вода верхнього водоносного горизонту із видобувної свердловини (2) за допомогою занурювального насоса відкачується на поверхню, далі по трубопроводу через баки-акумулятори (4) надходить у випарник теплового насоса (5), де віддає частину свого теплового потенціалу (2-3°C) низькокиплячій рідині (холодоагенту), яка циркулює в замкнутому контурі теплового насоса, охолоджується і повертається через поглинальну свердловину (3) назад у продуктивний горизонт. Мережева вода системи теплозабезпечення будівлі за допомогою циркуляційного насоса (6,7) надходить до конденсатора теплового насоса (5), забирає тепло у низькокиплячій рідині та надходить до опалювальних пристроїв (фанкойлів) системи тепlopостачання (8) (рис. 1). Зазначимо, що залежно від типу теплового насоса та виду холодоагенту температура в конденсаторі може досягати 60–120° С. Потім цикл повторюється.

У режимі кондиціювання підземна вода з видобувної свердловини через баки-акумулятори в обхід теплового насоса подається безпосередньо в мережу системи теплозабезпечення, а саме до фанкойлів, які в цьому

випадку функціонують як прилади кондиціювання. Підземна вода забирає надлишок теплової енергії з повітря приміщень, нагрівається і повертається через нагнітальну свердловину назад у водоносний горизонт. Після чого цикл повторюється, чим забезпечується створення комфортних умов перебування людей та роботи техніки в літній період.

Як зазначалось вище, основною особливістю використання гідротермальних теплонасосних систем відкритого типу, де як теплоносії використовуються підземні води верхніх водоносних горизонтів, є існування передпроектного етапу, протягом якого необхідно провести відповідні дослідно-фільтраційні роботи та визначити природний режим продуктивного горизонту, його фільтраційні властивості та умови формування, а також оцінити експлуатаційні запаси підземних вод водоносного горизонту. Без проведення відповідних заходів неможливо визначити експлуатаційні характеристики установи і забезпечити стабільну її роботу протягом усього терміну експлуатації. Також ці дані необхідні для оцінки впливу експлуатації експериментальної установки на тепловий, гідродинамічний і екологічний стан продуктивного водоносного горизонту та на навколишнє середовище ділянки дослідження.

Геолого-гідрогеологічні умови ділянки дослідження. У геолого-структурному відношенні ділянка

дослідження розташована в межах північно-східного пологого схилу Українського щита, що занурюється під область Дніпровсько-Донецької западини. Товща порід має двоповерхову будову: нижній поверх – кристалічний фундамент, що складається з кристалічних і метаморфічних порід докембрію, верхній – чохол, складений осадовими породами палеозойського, мезозойського і кайнозойського віку, потужністю до 400 м.

У геоморфологічному відношенні ділянка експериментальної установки розташована на території останця київського лесового плато, який обмежений із заходу – Новоселицькою, з півдня – Хотівською і зі сходу – Феофаніївською балками. Абсолютні позначки дна балок змінюються від 125 до 150 м. З півночі останець з'єднується з основним масивом київського лесового плато.

На дні балок розташовані водотоки з озерами, що мають непостійний характер, який на пряму залежить від кількості атмосферних опадів. На дні Феофаніївської балки розміщується серія Паладинських ставків.

За формою останець являє собою "язик", довжина якого (напрямок з півночі на південь) становить приблизно 1,5 км, а ширина (напрямок із заходу на схід) – 1 км. Рельєф "язика" досить плоский. Абсолютні позначки поверхні змінюються від 189 до 175 м, вододіл проходить уздовж шосейної дороги (вул. Метрологічна). Ухил правого крила становить 0,02, лівий схил крутіший.

Гідрогеологічна будова ділянки дослідження досить детально вивчена завдяки численним буровим роботам, що були тут проведені.

Гідрогеологічний розріз за результатами буріння від земної поверхні в глибину представлений такими водоносними горизонтами і водотривкими шарами:

1. Алювіально-делювіальні відклади першої надзапальної тераси складається щільними (середня щільність порід 1,6 г/см³) піщанистими суглинками з включенням гравію і гальки, іноді з прошарками і лінзами піску. Водозбагаченість горизонту невисока, у складі водовмісних порід переважають пилюваті і глинисті фракції. Залягає горизонт на глибині від 8 до 12 м, має сезонний характер і дуже залежить від кількості атмосферних опадів, що випадають на місцевості.

2. Водоносний горизонт у відкладах межигірської, берекської та новопетрівської світ олігоцен-міоцену (полтавська і харківська серії). Шари водовмісних відкладень не обмежені між собою водоупорами, гідравлічно пов'язані і розглядаються як єдиний водоносний горизонт. Горизонт відокремлюється від першого шаром строкатих глин неогенового віку, товщина якого досягає 20 м. Покривля горизонту знаходиться на глибині 32 м, а підосва – 50 м. Складається горизонт із сірого дрібнозернистого піску з прошарками алевритів і глин. Статичні рівні встановлюються на глибині 48–49 м. Горизонт безнапірний, тобто рівень води знаходиться нижче кривлі горизонту, верхня частина товщі горизонту суха. Водозбагаченість горизонту слабка, що пояснюється малою водовіддачею дрібнозернистих пісків полтавської свити. На дослідній ділянці приплив підземних вод з полтавського горизонту під час відкачки у процесі буріння становив 2–3 л/с з відповідним зниженням рівня на 6–7 м.

3. Бучаксько-канівський водоносний горизонт залягає на глибині від 90 до 117 м, складається з мілкого та дрібнозернистого піску. Горизонт сильно виснажений через активне використання його для водопостачання і господарських цілей. Статичні рівні встановлюються на відмітках 96 м, тобто верхня частина горизонту суха. Горизонт безнапірний. Відокремлюється від другого потужною (до 35 м) товщею строкатих глин неогену.

Для експериментальної гідротермальної енергетичної теплонасосної системи відкритого типу продуктивним є полтавський водоносний горизонт.

У плані горизонт має повсюдне поширення. Згідно з гідрогеологічною картою, площа поширення горизонту перевищує десятки км². Абсолютні позначки підосви горизонту становлять 127–131 м. Покривля горизонту розміщується на відмітках 150–165 м. Спостерігається незначне занурення горизонту в південному напрямку (4 м на 700 м).

Зверху і знизу горизонт ізольований пластами водотривких глин. Товщина верхнього шару глин сягає 20 м, нижнього – перевищує 35 м. За даними (Ситніков та ін., 2003), через верхній шар глин відбувається часткова фільтрація води з першого водоносного горизонту в продуктивний. Кількісно величину перетікання встановлено не було. Однак середньорічна величина живлення першого водоносного горизонту за рахунок інфільтрації атмосферних опадів становила 5,2 см.

Зазначимо, що побудова житлового кооперативу "Кришталеві джерела", у межах якого розташована ділянка експериментальної установки, дуже змінила природні гідрогеологічні умови верхніх водоносних горизонтів. Площа останця була значно збільшена шляхом насипання штучного ґрунту, як зверху (1,5–2 м), так і в ширину (до 100–150 м). Крім того, будівництво багатоповерхових будівель, асфальтування доріг, створення каналізаційної мережі та організація поверхневого стоку однозначно зменшили інфільтрацію атмосферних опадів, а отже й умови живлення верхнього водоносного горизонту. Тому можна припустити, що величина перетікання підземних вод з першого горизонту незначна та нею можна знехтувати.

У Новоселицькій та Феофаніївській балках полтавський водоносний горизонт розкритий ерозією і виходить на денну поверхню. У цих місцях спостерігається гідравлічний зв'язок горизонту з поверхневими водоймами, що розташовані на дні балок. Живлення горизонту здійснюється безпосередньо за рахунок інфільтрації атмосферних опадів.

Потік вод спрямований від вододілу на захід до Новоселицької балки.

Там, де строкаті глини неогену розмиті, здійснюється перелив ґрунтових вод першого водоносного горизонту в продуктивний горизонт. Живлення полтавського водоносного горизонту здійснюється за рахунок перетікання ґрунтових вод через товщу глин.

Свердловини, які були використані в ході дослідження. На території ділянки було пробурено 5 свердловин різного призначення (св. №№ 1, 7, 8, 10, 11). Усі свердловини (крім св. № 10) з'єднані підземними трубопроводами і облаштовані так, що можуть працювати як у режимі відкачки, так і у режимі нагнітання. Схема розташування, конструкції свердловин та геологічний розтин за профілем АБ показано на рис. 2 і рис. 3. та в табл. 1.

Свердловину № 1 було пробурено з метою дослідження ефективності методів освоєння теплоти ґрунту, свердловину № 7 – як додаткову для отримання дебіту з бучакського водоносного горизонту, свердловина № 10 є спостережною, вона облаштована датчиками температури. Безпосередньо в роботі експериментальної установки задіяні як експлуатаційні – св. № 8 і № 11.

Свердловину № 8 було пробурено на відстані 11,5 м від свердловини № 1. Глибина свердловини – 49,5 м, а діаметр буріння – 215 мм. Свердловина по всій глибині закріплена обсадними трубами діаметром 125 мм, в інтервалі глибин 40,5–49,5 м встановлено поліпропіленовий фільтр такого ж діаметру. Нижня частина

свердловини обладнана відстійником завдовжки 0,5 м із заглушкою з ПВХ. У середині свердловини на водопідйомних трубах діаметром 32 мм на глибині 43 м встановлено електрозанурювальний насос марки Водолій 80. Продуктивний водоносний горизонт відкладень межигірської, берекської та новопетрівської світ олігоцен-міоцену у свердловині № 8 розташований на глибині 32–50 м. Водовмісні породи представлені піском тонко- та дрібнозернистим світло сірим. Статичний рівень у ході буріння був встановлений на глибині 32,0 м, а температура підземних вод становила 10° С.

Для вивчення природного режиму полтавського водоносного горизонту у св. № 1 і № 10 з лютого 2020 р. дотепер проводяться спостережні виміри температури підземних вод і рівня у водоносному горизонті. Результати спостережень наведено на рис. 4.

Як видно з рис. 4, у полтавському горизонті відбувається поступове зниження рівня води. За період спостережень рівень упав майже на 1 м. Також фіксуються внутрішньорічні зміни рівнів у горизонті, причому в літньо-осінній період спостерігається часткове відновлення рівня, тоді як в осінньо-зимовий період відбувається його зниження. Температура підземних вод знизилась за період спостережень на 0,3° С.

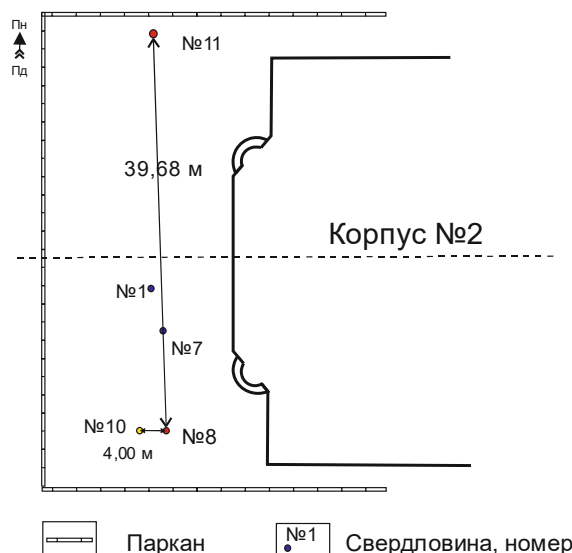


Рис. 2. Схема розташування свердловин на ділянці експериментальної гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу

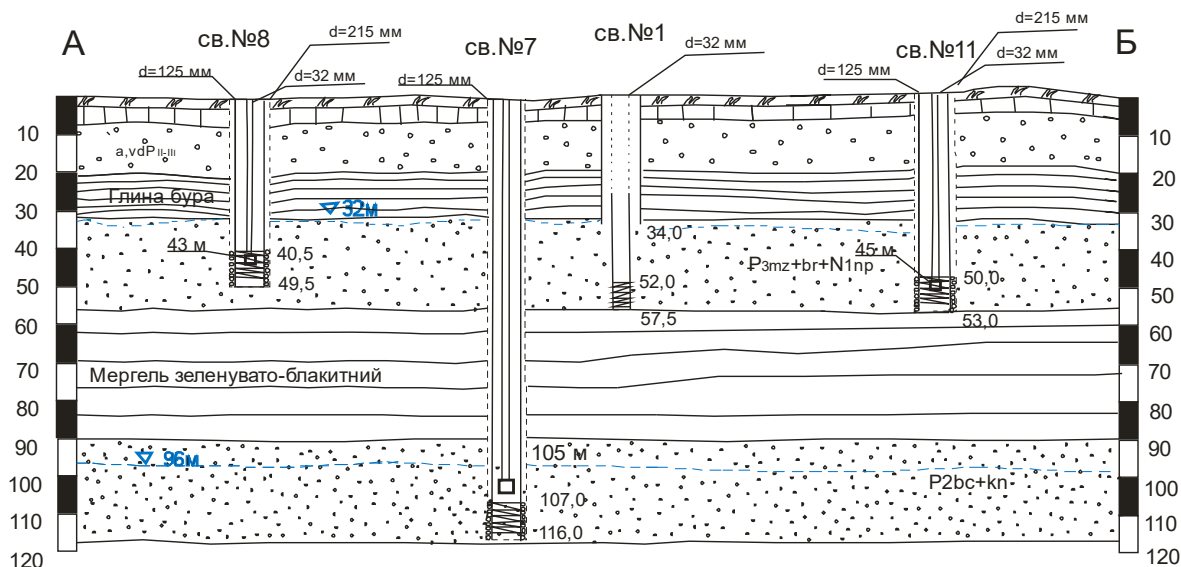


Рис. 3. Геолого-гідрогеологічний розтин експериментальної ділянки уздовж профілю АБ та технічні характеристики свердловин

Таблиця 1

Дані щодо свердловин, у яких проводились режимні спостереження

№ св.	Глибина, м	Конструкція				Інтервал встановлення фільтру, м	Продуктивний горизонт	Глибина установки насоса, м	Призначення свердловини
		I колона		II колона					
		Інтервал, м	Діаметр, мм	Інтервал, м	Діаметр, мм				
1	57	0-36	120	23-51,5	50	51,5-57	полтавський	немає	спостережна
7	117	0-108	125	-	-	108-117	бучакський	102	видобувна, нагнітальна
8	50	0-40,5	125	-	-	40,5-49,5	полтавський	43	видобувна, нагнітальна
10	54	0-50	125	-	-	50-53	полтавський	немає	спостережна
11	54	0-50	125	-	-	-	полтавський	45	видобувна, нагнітальна

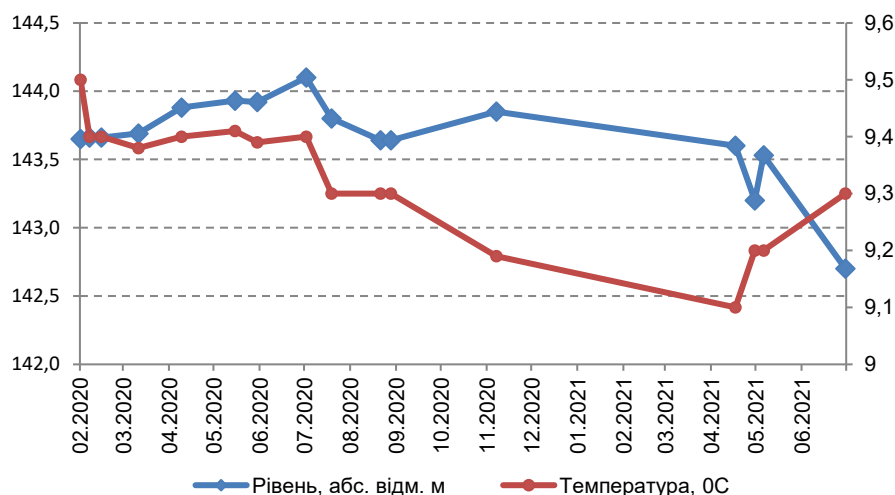


Рис. 4. Графік коливань рівня та температури підземних вод полтавського водоносного горизонту у свердловині № 1

Для визначення водозбагаченості полтавського горизонту у св. № 8 і № 11 було проведено пробне відкачування. Під час відкачування зі св. № 8 при зниженні рівня на 6 м дебіт становив 2–3 л/с, у св. № 11 при аналогічному дебіті зниження становило близько 5 м.

Хімічний аналіз проб води, яку було отримано під час відкачки зі св. № 8, показав, що води полтавського горизонту прісні, нейтральні (водневий показник дорівнює 6,98), жорсткі (загальна жорсткість – 12,65 ммоль/дм³) із загальною мінералізацією 635,6 мг/дм³. Деякі показники зразків не відповідають допустимим нормам для питних вод. Спостерігається незначне перевищення кількості загального заліза (0,23 ммоль/дм³) та кальцію (165,32 мг/дм³). У процесі експерименту передбачається вести спостереження за змінами хімічного і бактеріологічного складу підземних вод полтавського, а також нижчезташованого бучацького водоносних горизонтів.

Для визначення ефективності роботи гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу порівняно з аналогічною геотермальною теплонасосною системою закритого типу, як аналог було використано експериментальну гідротермальну енергетичну теплонасосну систему закритого типу, спроектовану та змонтовану в Українському державному геологорозвідувальному інституті (УкрДГРІ). Обидві системи мають тепловий насос однакової потужності.

Колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи закритого типу (рис. 5) являє собою два функціонально пов'язаних гідротермальних зонда, кожен з яких складається з двох пластикових труб, покладених кільцями з двох сторін металевої решітки. Вся конструкція гідротермального колектора встановлюється на дно водойми.

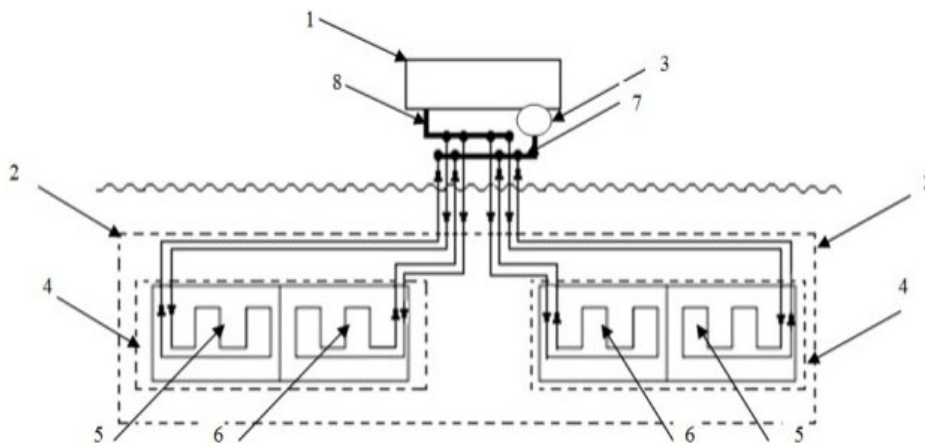


Рис. 5. Загальна схема гідротермальної енергетичної теплонасосної системи закритого типу:

1 – тепловий насос; 2 – колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи; 3 – циркуляційний насос; 4 – гідротермальний зонд; 5, 6 – нижня і, відповідно, верхня труба гідротермального зонду; 7 – гребінка подачі теплоносія; 8 – гребінка повернення теплоносія (Головський та Зур'ян, 2014)

Як і попередня, ця система працює у двох режимах: теплозабезпечення та кондиціювання.

У режимі теплозабезпечення теплоносії (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,

відповідною 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 контуру, за рахунок низькопотенціальної теплоти підземних вод випарюється та стискається компресорами теплового

насосу. Після стискання фреон з температурою 60–120° С потрапляє в конденсатор, де передає своє тепло в систему опалення будівлі через систему фанкойлів. Після чого цикл повторюється.

У режимі кондиціювання теплоносій (розчин пропіленгліколю), що циркулює по контуру колектор-тепловий насос, потрапляє з колектора гідротермальної теплонасосної системи, зануреного на дно водойми, і, минаючи конденсатор теплового насосу, подається безпосередньо на фанкойли, де забирає надлишкову теплову енергію з приміщення, та з температурою, вищою на 2–3° С знову потрапляє у колектор, занурений на дно водойми, де відновлює свій тепловий потенціал. Після чого цикл повторюється.

Наземна частина обох систем має однакові конструкції, і в них застосовуються теплові насоси однакової потужності. Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу відрізняється від гідротермальної теплонасосної системи закритого типу тільки конструкцією колектора. У першому випадку – це водоносний горизонт, а у другому – зонд, занурений на дно водойми. Наземна частина експериментальних енергетичних систем складається з акумулятора теплової енергії та елементів теплового насоса із системою автоматики.

Отримана первинна теплова енергія приповерхневих шарів води перекачується тепловим насосом у систему теплозабезпечення будівлі з температурою, необхідною для комфортних умов проживання людей і роботи техніки.

З метою проведення досліджень до складу комплексу включено вимірювальне обладнання і автоматизовану систему управління. Вимірювальні прилади, а саме – датчики температури і датчики витрат теплоносія, встановлені як у наземній, так і підземній частинах комплексу.

Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204, які внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України, за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур від -40 до +270° С, показник теплової інерції не більше 6–8 сек.

В обох системах встановлено датчики витрати теплоносія на кожній лінії подачі теплоносія як у

гідротермальні зонди, так і у свердловини, та, так само, по два датчики на загальних магістралях потоку теплоносія по низькотемпературному і високотемпературному контурах наземної частини обох систем.

Датчики температури, встановлені у свердловину гідротермальної теплонасосної енергетичної системи відкритого типу, дозволяють вимірювати температуру повітря в затрубному просторі свердловини на глибині 1 м, 2 м, 5 м, 10 м, 20 м, 30 м, 40 м і температуру води у свердловині на глибині 45 м.

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

Для прийому і перетворення сигналів, що надходять від термоперетворювачів опору ТСП-204, у значення температури, і відображення їх на вбудованому цифровому індикаторі, застосовувався вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів І8 8ТC/10-RS485-БП-12-ІПК-Щ. З метою візуалізації даних, отриманих з датчиків, у режимі реального часу, запису їх в архів та відображення отриманих даних у вигляді таблиць або графіків, використовувався індикатор логер І16П RS 485/43-USBGSM-ІПР-Д і програмне забезпечення (система збору даних) PerMik.

Для виконання порівняльного аналізу теплонасосних енергетичних систем було прийнято критерії, в яких враховано як фізичні параметри, так і техніко-економічні показники теплових насосів (ТН) (Олійніченко та Марченко, 2017).

1. Теплова продуктивність (англ. Coefficient of Performance, COP).

2. Коефіцієнт перетворення теплової енергії.

3. Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса.

4. Питома вартість на 1 кВт виробленої теплоти.

Експеримент проводився протягом опалювального сезону. У ході проведення експерименту попередньо задані параметри контуру конденсатора відповідно до методики проведення експерименту не змінювалися (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри контуру конденсатора теплового насосу гідротермальних теплонасосних систем відкритого та закритого типу в період проведення дослідження

Система	Витрати теплоносія м³/год	Температура на вході в конденсатор теплового насосу	Температура на виході з конденсатора теплового насосу	Температура подачі теплоносія в систему т/з будівлі	Потужність системи (кВт)
Гідротермальна теплонасосна система відкритого типу	3,2	41–50	45–55	50	14,2
Гідротермальна теплонасосна система закритого типу	3,2	41–50	45–55	50	14,2

Температура теплоносія на вході у випарник безпосередньо залежить від параметрів відновлюваного джерела.

Тепловий режим води у водоймі визначається кількома процесами, які відбуваються одночасно, такими як: сонячна радіація, випаровування, теплообмін з атмосферою, перенос тепла течіями, турбулентним перемішуванням вод та ін. Зазвичай прогрівання води відбувається зверху вниз.

Тепловий режим води у водоносному горизонті залежить від геотермальних особливостей району. Він відображає вікові, тектонічні, літологічні і гідродинамічні особливості водоносних горизонтів та є результатом

декількох природних та техногенних факторів, що впливають одночасно, таких, як сонячна радіація, випаровування, теплообмін з ґрунтом, перенос тепла, турбулентне перемішуванням вод, умови залягання водоносного горизонту, живлення і дренажу, а також клімат, біосферний та антропогенний вплив та ін.

У процесі проведення дослідження на обох енергетичних установках було отримано дані річних змін температур у водоймі і у свердловині на різних глибинах, а так само температури на вході і виході з випарника і конденсатора.

Експериментально встановлено, що для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу із забором

води із свердловини температура води на глибині 50 м є досить стабільною у часі та становить у середньому 10°C . Під час дослідження було встановлено незначні сезонні коливання температури води ($0,5\text{--}2^{\circ}\text{C}$) на виході зі свердловини. Теоретично обґрунтовано, що такі коливання температури води (теплоносія) можливі за рахунок теплообміну між стінками труби, по якій підіймається вода, та ґрунтом вище границі промерзання ($1\text{--}2\text{ м}$).

Експериментально встановлено, що для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу з теплообмінником установленим у водойму завглибшки 2,5 м, температура теплоносія на вході в конденсатор теплового насоса коливається в діапазоні від $2\text{--}5^{\circ}\text{C}$ у січні-лютому, у листопаді-квітні становить $10\text{--}14^{\circ}\text{C}$, а у червні-серпні, за температури води у водоймі $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$, температура теплоносія на вході у випарник не підіймається вище 20°C .

На основі експериментально отриманих даних витрат теплоносія по контуру конденсатора і значень температур на вході і виході з конденсатора теплового насоса, розраховано значення теплової продуктивності всієї енергетичної системи в цілому, яка складала 14 кВт по теплу для кожної з систем.

Були розраховані коефіцієнти трансформації для кожної з енергетичних систем для трьох зимових місяців року. Крім того, для порівняння обох гідротермальних систем із геотермальною теплонасосною системою закритого типу, де як система забору первинної теплової енергії використовуються вертикальні теплообмінники, встановлені у свердловини, були використані дані,

отримані під час попередніх досліджень (Гошовський та Зур'ян, 2014).

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру конденсатора визначається системою опалення будівлі. Ефективність системи обернено пропорційна температурі теплоносія на виході з конденсатора ТН. При проведенні експерименту в обох системах температура на виході конденсатора встановлювалася однаковою і становила $45\text{--}55^{\circ}\text{C}$.

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру випарника визначається джерелом низькопотенційної енергії і встановлюється на підставі аналітичних розрахунків залежно від середньої температури теплоносія на вході у випарник. Для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу та геотермальної теплонасосної системи закритого типу – $8\text{--}13^{\circ}\text{C}$, а для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу – $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$.

Питома вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії визначається вартістю монтажу колектора для збору низькотемпературної теплової енергії. Для гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу вартість монтажу в цінах 2021 р. становить 50–70 тис. грн, для геотермальної теплонасосної системи закритого типу – 100–140 тис. грн, а для гідротермальної теплонасосної системи закритого типу – 10–20 тис. грн. З урахуванням вартості теплового насоса, що сягає за цінами 2021 р. 210 тис. грн, відповідно вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії буде становити в середньому 19,3, 23,4 та 16 тис. грн. Отримані дані представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Підсумки аналізу теплонасосних енергетичних систем за критеріями, в яких враховані фізичні параметри та техніко-економічні показники

Система	COP	P (кВт)	Термін експлуатації (рік)	Питома вартість на 1 кВт (грн.)	Діапазон температур ефективної роботи теплонасосної системи
Гідротермальна система відкритого типу	4,5	14,2	30	19 300	8–13
Геотермальна система закритого типу	4,5	14,2	30	23 500	8–13
Гідротермальна система закритого типу	3,8	14,2	30	16 000	5–10

За підсумками виконаних розрахунків гідротермальна теплонасосна система відкритого типу, де як теплоносієм використовуються підземні води верхнього водоносного горизонту, має найкращу інвестиційну привабливість порівняно з іншими аналогічними системами, враховуючи привабливі економічні та технічні показники.

Разом з тим необхідно враховувати, що повернення відпрацьованого природного теплоносія назад у продуктивний водоносний горизонт змінює його природний тепловий і гідродинамічний режим і може спричинити негативний вплив на його стан.

Підземна вода, яка використовується в експериментальній установці, перебуває в замкнутому контурі, що виключає потрапляння забруднюючих речовин і контакту з повітрям, тому вважається, що вплив на продуктивний горизонт буде незначним. Крім того, технологічно в горизонт закачується по чергову то охолоджена, то нагріта вода. На цьому етапі закінчуються монтажні та підготовчі роботи для проведення дослідно-експлуатаційних випробувань експериментальної гідротермальної установки. Тому оцінка екологічного впливу використання водоносних горизонтів з енергетичною метою за допомогою теплових насосів – це завдання подальших досліджень.

Висновки.

1. Аналітично обґрунтовано і експериментально підтверджено, що незаперечною перевагою гідротермальної теплонасосної системи відкритого типу, де як теплоносієм використовуються підземні води, є стабільна робота протягом року за рахунок малої девіації температури теплоносія на вході у випарник теплового насоса, крім того, така гідротермальна теплонасосна енергетична система вимагає відносно невеликих початкових інвестицій і при цьому має найбільший коефіцієнт перетворення теплової енергії (коефіцієнт трансформації) у зимовий період – 4,5. Аналогічні за потужністю і конструкцією енергетичні гідротермальні системи мають коефіцієнт трансформації в зимовий період у середньому 3,8.

2. Обґрунтовано, що для ефективного використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплової енергії необхідно якісне попереднє вивчення геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних умов ділянки проведення бурових робіт та виконання попередніх гідрогеологічних досліджень.

3. Визначено, що при використанні водоносного горизонту як акумулятора теплової енергії для роботи гідротермальних систем відкритого типу необхідно

унеможливити контакт підземних вод із зовнішнім повітрям та забезпечити системне проведення моніторингу стану підземних вод із свердловини, що використовується для роботи теплового насосу.

4. Мають перспективу подальші дослідження можливостей та ефективності використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплоти для стабілізації генерування енергії від відновлюваних джерел незалежно від кліматичних умов і пори року.

Список використаних джерел

- Баріло, А.А. (2017). Перспективы использования геотермальных технологий на территории Чернобыльской зоны отчуждения. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, 4-6, 64-69.
- Боревский, Б.В., Самсонов, Б.Г., Язвин, Л.С. (1973) Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра.
- Гошовский, С.В., Зурьян, А.В. (2013). Анализ изменения температур в верхних слоях Земли при решении задач грунтового аккумулирования и извлечения теплоты геотермальными системами закрытого типа. *Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине, 9-13 сентября 2013 г., Судак, АР Крым, Украина. Тезисы докл. УкрГГРИ*, 32-35.
- Гошовский, С.В., Зурьян, А.В. (2015). Анализ применения различных источников возобновляемой энергии для оптимальной работы теплонасосных систем. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 2, 9-20.
- Гошовський, С.В., Зур'ян, О.В. (2014). Екологічно безпечно використання гідроенергетичного потенціалу гідротермальними енергетичними системами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(87), 67-74.
- Долінський, А.А., Драганов, Б.Х. (2008). Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий. *Промышленная теплотехника*, 30, 6, 71-83.
- Елистратов, С.Л. (2011). Комплексное исследование эффективности тепловых насосов. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14*. Новосибирск.
- Калнинь, И.М. (1996). Техника низких температур на службе энергетики. *Холодильное дело*, 1, 26-29.
- Кириченко, А.С. (2014). Повышение эффективности работы подземного теплового аккумулятора. *Научный журнал КубГАУ*, 103(09), 1-18.
- Кудря, С.О. (2004). Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Київ: НТУУ "КПІ" ВПІ "Політехніка".
- Кудря, С.О. (2020). Відновлювані джерела енергії. ІБЕ НАН України, Київ
- Лисак, О.В. (2020). Аналіз системи центрального теплопостачання за використання сезонного геотермального акумулювання в комбінації з системою виробництва та споживання водно. *Відновлювана енергетика*, 3, 70-88.
- Малкін, Е.С., Кулінко Є.О. (2014). Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового аккумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 17, 63-69.
- Морозов, Ю.П., Баріло, А.А., Чалаєв, Д.М., Добровольський, М.П. (2019). Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і холодопостачання. *Відновлювана енергетика*, 2, 70-78.
- Морозов, Ю.П., Чалаєв, М.М., Величко, В.В. (2017). Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов. *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, 4-6, 70-79.
- Морозов, Ю.П., Чалаєв, Д.М., Олійніченко, В.Г., Величко, В.В. (2019). Експериментальне дослідження добового акумулювання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*, 3(58), 67-77. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).67-77)
- Накорчевский, К. И. (2010). Грунтовые аккумуляторы теплоты и модернизация коммунальной теплоэнергетики. Институт технической теплофизики.
- Олійніченко, В.Г., Марченко, Е.В. (2017). Сравнительный анализ типов технологического исполнения тепловых насосов. *Материалы XVIII Международной научно – практической конференции: Возобновляемая энергетика и энергоэффективность в XXI столетии*, 27-29 сент. 2017 г., Киев, 604-609.
- Ситников, А.Б., Головаченко, Ю.Г., Ткаченко, К.Д. (2003). Гидрогеологическая станция "Феофания": многолетние исследования и результаты. Институт геологических наук НАН Украины, Киев.
- Федянин, В.Я., Карпов, М.К. (2006). Использование грунтовых теплообменников в системах теплоснабжения. *Ползуновский вестник*, 4, 98-103.
- Шубенко, В.О., Кухарець, С.М. (2014). Використання низькотемпературних джерел енергії та їх перетворювачів. Перспективи розвитку альтернативної енергетики на Поліссі України. Київ: Центр учбової літератури, 240-261.
- Яценко, Л.В., (2017). Определение эффективности использования комбинированных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии. *Техническая электродинамика*, 34-41.
- Deng, J., Wei, Q., He, S., Liang, M., Zhang, H. (2020). Simulation Analysis on the Heat Performance of Deep Borehole Heat Exchangers in Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems, *Energies*, 13(3), 754; <https://doi.org/10.3390/en13030754>
- Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>

- Kim, S.-K., Lee, Y. (2020). Evaluation of Ground Temperature Changes by the Operation of the Geothermal Heat Pump System and Climate Change in Korea. *Water*, 12(10), 2931. <https://doi.org/10.3390/w12102931>
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile. *Anal. Meth. Geomech*, 30, 763-781.
- Lund, J.W., Aniko, N. (2021). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P. (2019). Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>
- Morrison, G., Anderson, T., Behnia, M. (2004). Seasonal performance rating of heat pump water heaters. *Solar Energy*, 76, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.007>
- 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>

Reference

- Barilo, A.A. (2017). Prospects for the use of geothermal technologies in the Chernobyl Exclusion Zone. *International Scientific Journal of Alternative Energy and Ecology*, 4-6, 64-69. [in Ukrainian]
- Borevsky, B.V., Samsonov, B.G., Yazvin, L.S. (1973). Methods for determining the parameters of aquifers from pumping data, M.: Nedra. [in Russian]
- Deng, J., Wei, Q., He, S., Liang, M., Zhang, H. (2020). Simulation Analysis on the Heat Performance of Deep Borehole Heat Exchangers in Medium-Depth Geothermal Heat Pump Systems, *Energies*, 13(3), 754; <https://doi.org/10.3390/en13030754>
- Dolinsky, A.A., Draganov, B.Kh. (2008). Heat pumps in the heating system of buildings. *Industrial heating technology*, 30, 6, 71-83. [in Russian]
- Elistratov, S.L. (2011). Comprehensive study of the efficiency of heat pumps. *Extended abstract of Doctor's thesis (Tech.): 01.04.14*. Novosibirsk. [in Russian]
- Fedyanin, V.Ya., Karpov, M.K. (2006). The use of ground heat exchangers in heat supply systems. *Polzunovsky Bulletin*, 4, 98-103. [in Russian]
- Goshovsky, S.V., Zurian, O.V. (2014). Ecologically safe use of hydropower potential by hydrothermal energy systems. *Visnyk of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (87), 67-74. [in Ukrainian]
- Goshovskiy, S.V., Zurian, A.V. (2013). Analysis of temperature changes in the upper layers of the Earth when solving problems of ground accumulation and heat extraction by closed-type geothermal systems. *Prospects for the use of alternative and renewable energy sources in Ukraine, September 9-13, 2013, Sudak, AR Crimea, Ukraine. Abstracts of UkrGRI*, 32-35. [in Russian]
- Goshovskiy, S.V., Zurian, A.V. (2015). Analysis of the use of various renewable energy sources for the optimal operation of heat pump systems. *Zbirnik naukovikh prats UkrDGRI*, 2, 9-20. [in Russian]
- Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002>
- Kalnin, I.M. (1996). Low temperature technology at the service of energy. *Refrigeration*, 1, 26-29. [in Russian]
- Kim, S.-K., Lee, Y. (2020). Evaluation of Ground Temperature Changes by the Operation of the Geothermal Heat Pump System and Climate Change in Korea. *Water*, 12(10), 2931. <https://doi.org/10.3390/w12102931>
- Kirichenko, A.S. (2014). Improving work efficiency, underground heat accumulator. *Scientific journal KubGAU*, 103 (09), 1-18. [in Russian]
- Kudria, S.O. (2004). Unconventional and renewable energy sources. Kyiv: NTUU "KPI" VPI "Polytechnic". [in Ukrainian]
- Kudria, S.O. (2020). Renewable energy sources. IRE NAS of Ukraine, Kyiv. [in Ukrainian]
- Laloui, L., Nuth, M., Vulliet, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile. *Anal. Meth. Geomech*, 30, 763-781.
- Lisak, O.V. (2020). Analysis of the district heating system using seasonal geothermal storage in combination with the system of hydrogen production and consumption. *Renewable Energy*, 3, 70-88. [in Ukrainian]
- Lund, J.W., Aniko, N. (2021). Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- Malkin, E.S., Kulinko, E.A. (2014). Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use the surface layers of water as a heat accumulator. *Ventilation, lighting and heat and gas supply*, 17, 63-69. [in Ukrainian]
- Matos, C.R., Carneiro, J.F., Silva, P.P. (2019). Overview of Large-Scale Underground Energy Storage Technologies for Integration of Renewable Energies and Criteria for Reservoir Identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.11.023>
- Morozov, Yu.P., Barilo, A.A., Chalaev, D.M., Dobrovolsky, M.P. (2019). Energy efficiency of using the first aquifers from the surface for heat and cold supply. *Renewable energy*, 2, 70-78. [in Russian]
- Morozov, Yu.P., Chalaev, D.M., Olyinichenko, V.G., Velichko, V.V. (2019). Experimental study of daily accumulation of cold by using water of

underground horizons of Kyiv. *Renewable Energy*, 3, 67-77. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3\(58\).67-77/](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.3(58).67-77/) [in Ukrainian]

Morozov, Yu.P., Chalaev, M.M., Velichko, V.V. (2017). Decentralized heat supply with geothermal heat pumps. *International scientific journal Alternative energy and ecology*, 4-6, 70-79. [in Russian]

Morrison, G., Anderson, T., Behnia, M. (2004). Seasonal performance rating of heat pump water heaters. *Solar Energy*, 76, 147-152. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.007>

Nakorchevsky, K.I. (2010). Soil heat accumulators and modernization of communal heat and power engineering. Institute of Technical Thermophysics. National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. [in Russian]

Olynychenko, V.G., Marchenko, E.V. (2017). Comparative analysis of types of technological execution of heat pumps. *Proceedings of the XYIII International Scientific and Practical Conference: Renewable energy and energy efficiency in the XXI century*, September 27-29, 2017, Kyiv, 604-609. [in Ukrainian]

Shubenko, V.O., Kukharets, S.M. (2014). Use of low-temperature energy sources and their converters. *Prospects for the development of alternative energy in Polissya of Ukraine*. Kyiv: Center for Educational Literature, 240-261. [in Ukrainian]

Sitnikov, A.B., Golovchenko, Yu.G., Tkachenko, K.D. (2003). Hydrogeological station "Feofania": long-term research and results. Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev.

Yatsenko, L.V. (2017). Determination of the efficiency of using combined energy systems based on renewable energy sources. *Technical electrodynamics*, 34-41. [in Russian]

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>

Надійшла до редколегії 03.10.21

O. Zurian, PhD (Techn.), Senior Researcher,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
A. Barilo, Senior Researcher,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Institute of Renewable Energy of the NAS Ukraine,
20-a Hn. Khotkevycha Str., Kyiv, 02094, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF HYDROTHERMAL HEAT PUMP INSTALLATIONS OF CLOSED AND OPEN TYPES WITH DIFFERENT SOURCES OF LOW-POTENTIAL ENERGY

The article is devoted to a new direction of using the waters of the upper aquifers and open reservoirs for heat and cold supply of residential and public buildings and structures. The theoretical analysis of technologies of construction and features of use of natural accumulators of thermal energy in aquifers is carried out. The general schemes of construction of hydrothermal power systems of closed and open type are described. The hydrothermal experimental heat pump power system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine consisting of a heat pump and two wells with a depth of 49.5 m and 57.5 m, through which water is pumped or pumped from the aquifer, is presented. The geomorphological, geological and hydrogeological conditions of the study site are analyzed. The peculiarities of the formation of groundwater reserves of the productive horizon are described. Further directions of hydrogeological observations have been determined.

The efficiency of the hydrothermal heat pump energy system of the open type is scientifically substantiated. Research methods are described. The characteristics of the measuring equipment and the software which was used for archiving and visualization of the data received in the course of carrying out research work are resulted.

The results of experimental researches are presented. A comparative analysis of the efficiency and investment attractiveness of the hydrothermal system of open and closed type, where low-potential thermal energy of water is used as a renewable primary source of thermal energy for the operation of the heat pump was carried out.

It is established that the use of renewable low-potential ground energy for the operation of geothermal energy systems is widely used in environmentally safe and economically attractive energy systems. However, the use of hydropower potential in hydrothermal energy systems is not widely used, despite the high technical and economic performance. It is proved that the existing hydrothermal systems are not always adapted to the operating conditions and location of the facility. There is no method of designing open-type hydrothermal systems, methods of conducting preliminary hydrogeological studies of the area planned for the installation of these systems and methods of calculating the parameters of the storage medium.

The data obtained during the study are of great scientific and applied importance in the design of hydrothermal energy heat pump systems. In addition, there are prospects for further research into the possibility and effectiveness of using the aquifer as a natural heat accumulator to stabilize the generation of energy from renewable sources, regardless of climatic conditions and time of year.

Keywords: heat pump, hydrothermal system, aquifer, low-grade water energy.

A. Зур'ян, канд. техн. наук, науч. сотр.,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net;
А. Барыло, науч. сотр.,
E-mail: geotherm@ukr.net;
Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,
Ул. Г. Хоткевича, 20-а, Киев, 02094, Украина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ЗАКРЫТОГО И ОТКРЫТОГО ТИПОВ С РАЗНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Посвящено новому направлению использования вод верхних водоносных горизонтов и открытых водоемов для тепло- и холодоснабжения жилых и общественных зданий и сооружений. Приведен теоретический анализ технологий построения и особенностей использования природных аккумуляторов тепловой энергии в водоносных горизонтах. Описаны общие схемы построения гидротермальных теплонасосных систем закрытого и открытого типа. Представлена разработанная и сконструированная в Институте возобновляемой энергетики НАН Украины гидротермальная теплонасосная система, состоящая из теплового насоса и двух скважин глубиной 49,5 м и 57,5 м. Проведен анализ геоморфологических, геологических и гидрогеологических условий участка исследования. Описаны особенности формирования запасов подземных вод продуктивного горизонта. Определены дальнейшие направления проведения гидрогеологических наблюдений.

Научно обоснована эффективность гидротермальной теплонасосной системы открытого типа. Описана методика проведения исследований. Приведены характеристики измерительного оборудования и программного обеспечения, которое использовалось для архивации и визуализации данных, полученных в процессе проведения научно-исследовательской работы.

Приведены результаты экспериментальных исследований. Проведен сравнительный анализ эффективности и инвестиционной привлекательности гидротермальных теплонасосных систем открытого и закрытого типов, где в качестве возобновляемого первичного источника тепловой энергии для работы теплового насоса используется низкопотенциальная тепловая энергия воды.

Установлено, что использование возобновляемой низкопотенциальной энергии грунта для работы геотермальных теплонасосных систем широко применяется в экологически безопасных и экономически привлекательных системах получения тепловой энергии. Вместе с тем использование гидроэнергетического потенциала в гидротермальных теплонасосных системах не имеет широкого применения, несмотря на высокие технические и экономические показатели. Доказано, что имеющиеся гидротермальные системы не всегда адаптированы к условиям эксплуатации и местоположения объекта. Отсутствуют методики проектирования гидротермальных теплонасосных систем открытого типа, методики проведения предварительных гидрогеологических исследований района, планирования для монтажа данных систем, и методики расчета параметров аккумулирующей среды.

Полученные в ходе исследования данные имеют важное научное и прикладное значение при проектировании гидротермальных теплонасосных систем. Кроме того, имеют перспективу дальнейшие исследования возможностей и эффективности использования водоносного горизонта в качестве естественного аккумулятора теплоты для стабилизации генерирования энергии от возобновляемых источников независимо от климатических условий и времени года.

Ключевые слова: тепловой насос, гидротермальная система, водоносный горизонт, низкопотенциальная энергия воды.