ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.506;620.92;620.987
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.10

С. Гошовський, д-р техн. наук, проф.
E-mail: ukrdgri@ukrdgri.gov.ua,
ORCID ID 0000-0002-8312-6244;
О. Зур'ян, канд. техн. наук
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net,
ORCID ID 0000-0002-2391-1611;
Український державний геологорозвідувальний інститут (УкрДГРІ),
вул. Автозаводська, 78А, м. Київ, Україна

ЕКЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ГІДРОТЕРМАЛЬНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Наведено результати науково-дослідної та конструкторської роботи щодо екологічно-безпечного використання гідроенергетичного потенціалу малих річок басейну Дніпра. Запропоновані та науково обґрунтовані інноваційні конструкторські рішення для відбору низькопотенційної теплової енергії води та систем її перетворення на енергію зручну для споживання. Встановлено, що використання відновлюваної низькопотенційної енергії ґрунту для роботи геотермальних теплонасосних 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. Доведено, що наявні гідротермальні системи не завжди адаптовані до умов експлуатації та місця розташування об'єкта. Обґрунтовано, що актуальним є питання наукового підходу до розробки необхідної конфігурації гідротермального колектора, методології оптимального його розміщення й визначення ефективності залежно від умов експлуатації. Науковою новизною нового технологічного підходу є використання водяного колектору спеціальної конструкції, який має модульну структуру й складається з декількох функціонально пов'язаних водяних зондів. Науково обґрунтовано ефективність гідротермальної системи. 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 теплова енергія води. З метою проведення досліджень авторами була розроблена експериментальна гідротермальна теплонасосна система та геотермальна теплонасосна система. Встановлено датчики температури, тиску і швидкості протоку теплоносія як на колекторі, так і у наземній частині системи. Створено комп'ютерну систему архівування і візуалізації отриманих даних Розроблено методику проведення досліджень. У ході проведення дослідження отримано експериментальні дані та виконано розрахунки ефективності роботи геотермальної і гідротермальної систем. Виконано порівняльний аналіз енергетичних систем залежно від відновлюваного джерела енергії. Зроблено висновок щодо екологічної безпечності використання гідротермальних теплонасосних систем. Отримані у ході дослідження дані мають важливе наукове і прикладне значення при проєктуванні енергетичних теплонасосних систем з використанням гідроенергетичного потенціалу малих річок.

Ключові слова: мала гідроенергетика, гідротермальна система, водяний колектор, відновлювана енергетика.

Постановка проблеми. Одним із питань сьогодення, що найбільш гостро стоїть перед світовим суспільством і потребує нагального вирішення, є питання забезпечення енергетичної та екологічної безпеки. Сучасний стан техногенного навантаження енергетики на довкілля характеризується значними викидами забруднюючих речовин (ЗР) підприємств паливно-енергетичного комплексу (ПЕК). Питома вага викидів ПЕК основних парникових газів – діоксиду вуглецю (CO_2) та метану (CH_4) становить відповідно 88 % та 66 % від загального обсягу викидів. Концентрації викидів оксидів азоту сягають 600–1400 мг/нм^3, за норми – 200–600 мг/нм^3; твердих часток – до 1000–1500 мг/нм^3, за норми – 50–100 мг/нм^3; діоксиду сірки – 3000–8000 мг/нм^3, за норми – 400–2000 мг/нм^3. Обсяги використання свіжої води та відведення забруднених вод підприємствами галузей електроенергетики становлять відповідно 31 % та 20 % від їх загального обсягу. На території України розміщено понад 1200 породних відвалів вугільних шахт та збагачувальних фабрик, які займають площу понад 10 тис. га, щорічний обсяг накопичення відходів вуглевидобутку й вуглезбагачення становить понад 42 млн т (*Каплун, 2014*).

Одним із шляхів вирішення як енергетичної, так і екологічної проблеми в Україні є розвиток альтернативної нетрадиційної енергетики на основі використання відновлюваних екологічно чистих джерел енергії. На сьогодні серед відновлюваних джерел енергії однією з перспективних є мала гідроенергетика. Однак, маючи незначну питому вагу (близько 2 %) у загальному енергобалансі вона не може істотно впливати на умови енергозбереження країни (*Басюк, 2011*). Сучасні технології будівництва малих ГЕС є модернізованими варіантами конструктивних елементів (робочих органів), які обґрунтовані на старому традиційному технологічному підході щодо використання гідроенергетичного потенціалу річок. Експлуатація таких ГЕС не може кардинально вирішити проблему розвитку малої гідроенергетики, оскільки потужності їх є незначними, а сумарний вплив на русловий режим надзвичайно суттєвий (*Ободовський та ін., 2019*). Разом з тим використання відновлюваної низькопотенційної енергії як ґрунту, так і поверхневих вод (річок, озер, водосховищ, морів) для роботи геотермальних і гідротермальних теплонасосних систем може бути застосовано в екологічно чистих і економічно вигідних енергетичних системах. У природі, промисловому виробництві, сільському виробництві, побуті є значні запаси розсіяної низькотемпературної теплової енергії, яку можна ефективно використати. Для її концентрації застосовують теплові насоси (ТН) – це пристрої, які за допомогою механічної або електричної енергії трансформують теплову енергію низького потенціалу в теплову енергію більш високих параметрів. Теплові насоси є найбільш перспективними серед джерел "нетрадиційної енергетики" для вирішення проблем енергозбереження завдяки можливості "черпати" відновлювану енергію з навколишнього природного та техногенного середовища (*Шубенко та Кухарець, 2014*). Основна відмінність теплового насоса від інших перетворювачів відновлюваної теплової енергії полягає в тому, що при виробництві тепла до 80 % енергії витягується з навколишнього середовища: ґрунту, води, повітря. Однак така система, як тепловий насос, має і недоліки, які зумовлені суттєвою залежністю ефективність від температури низькопотенційного джерела тепла. Актуальним є питання наукового підходу до розробки необхідної конфігурації колектора для відбору теплової енергії навколишнього середовища, методології оптимального його розміщення й визначення ефективності залежно від умов експлуатації.

© Гошовський С., Зур'ян О., 2019

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки питанням ефективності енергетичних теплонасосних систем, що використовують теплову енергію довкілля присвячена велика кількість досліджень (*Boyle, 2004; Tidwell and Weir, 2006*). Базові типи теплонасосних систем методом парних порівнянь досліджені науковцями (*Ильин, 2010; Федянин та Карпов, 2006*). Аналіз ефективності різних типів теплонасосних систем проведено в роботах (*Попов, 2005; Laloui et al., 2006; Яценко, 2017*). У дослідженні (*Олийниченко та Марченко, 2017*) запропоновано новий підхід до оцінки ефективності теплонасосних систем. У роботі (*Калнинь,1996*) проведено оцінку ефективності різних варіантів теплових насосів за коефіцієнтом використання первинної енергії. Автором (*Елистратов, 2011*) виконаний термодинамічний аналіз різних типів ТН. Огляд теплових насосів систем водяного опалення та оцінка сезонної продуктивності теплонасосних систем викладено в роботах (*Hepbasli and Kalinci, 2009; Morrison et al., 2004*). Сукупність математичних моделей, що дозволяють розраховувати процеси тривалого акумулювання тепла у навколишньому природному середовищі з подальшим її видобуванням, наведено в монографії (*Накорчевский, 2010*). Також автором встановлена низька ефективність роботи одиночних теплообмінників і обґрунтовано суттєве підвищення технологічних показників у разів групового їх розташування. У роботах (*Яцик та Стичаковська, 2008; Басюк, 2011; Ободовський та ін., 2019*) розглядаються питання стану малої гідроенергетики України, соціально-економічних аспектів її розвитку та впливу на природне середовище.

Виділення невирішених раніше проблем частин загальної проблеми. Сьогодні з упевненістю можна сказати, що перші кроки у цьому напрямі вже зроблені, але вони ще досить повільні. Використання відновлюваної низькопотенційної енергії ґрунту для роботи геотермальних теплонасосних систем широко застосовується в екологічно безпечних та економічно ефективних енергетичних системах. Разом з тим використання гідроенергетичного потенціалу в гідротермальних теплонасосних системах не має широкого застосування та наукового обґрунтування ефективності як водяного колектора, так і системи в цілому. Актуальними залишаються питання розробки методик проєктування модульних колекторних систем для ефективного отримання екологічно безпечної відновлюваної енергії.

Метою дослідження є розробка теоретичних основ та науково-методичних засад щодо доцільності використання гідроенергетичного потенціалу малих річок у гідротермальних теплонасосних системах, дослідження очікуваного екологічного та економічного ефекту від впровадження даних систем. Визначення за допомогою експериментальних досліджень і аналітичних розрахунків ефективності системи теплопостачання залежно від використовуваного джерела низькопотенційного тепла і конструктивних особливостей системи колекторів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Енергозбереження має бути направлено на економію енергоресурсів та зниження навантаження на навколишнє середовище. Побутовий сектор нашої країни відрізняється високим споживанням енергоресурсів порівняно з Європейськими країнами. Одним з варіантів економії енергоресурсів є використання низькопотенційних джерел тепла за допомогою теплових насосів для теплопостачання. Цей метод екологічно безпечний і досить дешевий. Він уже багато років використовується для опалення будівель різного призначення і гарячого водопостачання у ряді країн Західної Європи, США, Японії та ін. В Україні теплові насоси з'явилися лише недавно, але попит на них швидко зростає. Світовий рівень використання низькопотенційної теплової енергії з допомогою теплових насосів наведено в табл. 1 (*Друкований та Ковальський, 2017*).

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA) до 2020 р. у розвинених країнах світу частка опалення й гарячого водопостачання за допомогою теплових насосів повинна скласти 75 %. Щодо України, то у "Концепції розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року" передбачається збільшення обсягу виробництва теплової енергії за рахунок термотрансформаторів – теплових насосів й акумуляційних електронагрівачів до 180 млн Гкал/рік до 2030 р.

Таблиця 1

Світовий рівень використання низькопотенційної теплової енергії за допомогою теплових насосів за (*Друкований та Ковальський, 2017*)

Країна	Встановлена потужність, МВт	Вироблена енергія, ГДж/рік
Австралія	22,0	57,6
Австрія	228,0	1094,0
Болгарія	13,3	162,0
Велика Британія	0,6	2,7
Греція	0,4	3,1
Данія	3,0	20,8
Ісландія	4,0	20,0
Італія	1,2	6,4
Канада	360,0	891,0
Литва	24,5	338,9
Нідерланди	10,8	57,4
Німеччина	344,0	1149,0
Норвегія	6,0	31,9
Польща	26,2	108,3
Росія	1,2	11,5
Словаччина	1,4	12,1
Словенія	2,6	46,8
США	4800	12000,0
Туреччина	0,5	4,0
Угорщина	3,8	20,2
Фінляндія	85,0	484,0
Франція	48,0	255,0
Чехія	8	338,2
Швейцарія	300	1962,0
Швеція	377	4128,0
Японія	3,9	64,0
Всього	**6 675,4**	**23 268,9**

Впровадження в Україні теплових насосних станцій дасть можливість отримати додатково теплову енергію, у середньому із загальною потужністю 909,48 МВт, та економити щорічно до 614,650 млн м^3 природного газу. В Україні планується досить широко використовувати природні низькопотенційні джерела енергії, зокрема воду – морську та річкову, відсоток отримання теплової потужності від якої є досить високим та коливається у межах 22–98 % у різних регіонах. Відсоток отримання теплової потужності від використання води як низькотемпературного джерела енергії у Житомирській області становить 98,2 %, у Чернігівській області – 96,6%, в Автономній Республіці Крим – 90,6 %, у Запорізькій області – 70,3 %, у Вінницькій, Миколаївській, Полтавській, Черкаській, Чернівецькій областях – 100 % (*Кудря та ін., 2001*).

Найбільші щорічні обсяги економії природного газу від використання теплонасосних систем у структурі областей України припадають на Дніпропетровську область – 19,36 %, Київську та Луганську області – приблизно по 15 %, Автономну Республіку Крим – 11,19 %, Вінницьку область – 8,05 %, Житомирську Херсонську, Запорізьку області – приблизно по 5 %.

Слід зазначити, що нині у нашій державі працюють лише одиничні установки, а створення і впровадження теплових насосів базується переважно на ентузіазмі науковців, інженерів та конструкторів за рахунок інвестицій далекоглядних керівників підприємств та власників особистих домогосподарств.

Перспективним напрямом енергозаощадження є застосування екологічно чистих теплонасосних технологій, де як первинне джерело низькопотенційної теплоти використовується приповерхнева вода малих рік та закритих водойм.

Для проведення досліджень в Українському державному геологорозвідувальному інституті (УкрДГРІ) було спроєктовано і сконструйовано дві експериментальні енергетичні теплонасосні системи: гідротермальну та геотермальну. Принципову схему гідротермальної експериментальної системи наведено на рис. 1.

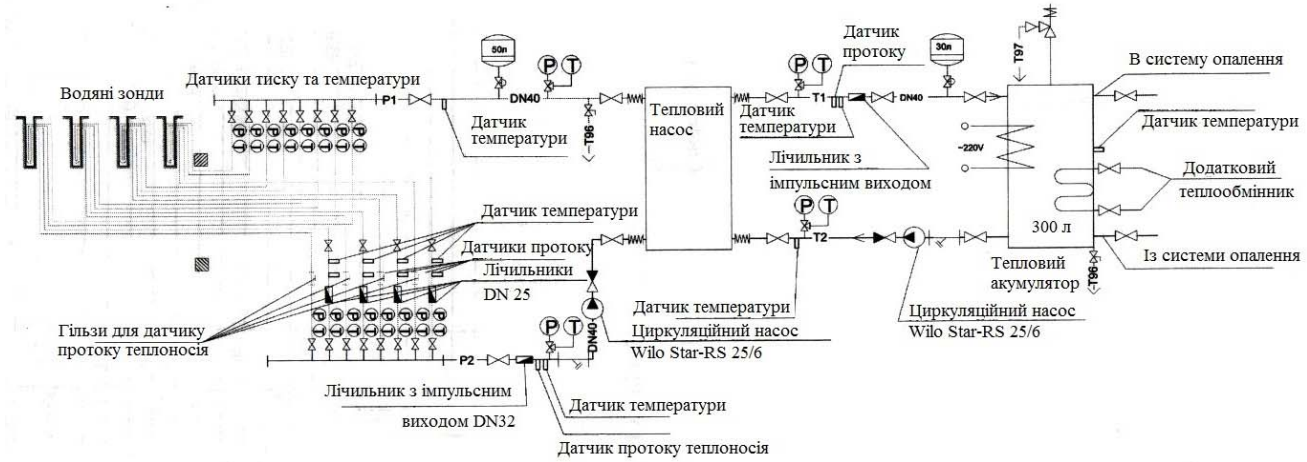

Рис. 1. Принципова схема експериментальної гідротермальної енергетичної системи УкрДГРІ

Наземна частина обох систем має однакову конструкцію та в обох застосовуються теплові насоси однакової потужності. Геотермальна енергетична система конструктивно відрізняється від гідротермальної тільки конструкцією теплообмінника (колектора) і джерелом використовуваної відновлюваної енергії. У першому випадку це низькопотенційна теплова енергія ґрунту, у другому – низькопотенційна теплова енергія води.

Наземна частина експериментальної енергетичної системи складається з акумулятора теплової енергії та елементів теплового насоса з системою автоматики.

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

Колектор для збору низькотемпературної теплової як першої, так і другої енергетичної системи виготовлений з пластикової труби діаметром 32 мм і складається з чотирьох паралельно з'єднаних теплообмінників. Довжина труби в кожному теплообміннику становить 200 м. Загальна довжина колектора сягає 800 м. Як теплоносій використовувався 25 % водний розчин пропіленгліколю ($C_3H_8O_2$).

Науковою новизною нового технологічного підходу є використання водяного колектора, який має модульну структуру й складається з декількох функціонально пов'язаних водяних зондів. Технологічною особливістю системи є відсутність забору води з водойми для роботи теплового насосу, що виключає негативний вплив на якість води. Вона не втрачає початкових природних якостей і може використовуватися для водопостачання населенню.

Колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи (рис. 2.) являє собою два функціонально пов'язаних гідротермальних зонди, кожен з яких складається з двох пластикових труб, покладених кільцями з двох сторін металевої решітки (рис. 3). Вся конструкція гідротермального колектора встановлюється на дно водойми.

Колектор геотермальної теплонасосної енергетичної системи являє собою вісім U-подібних функціонально пов'язаних геотермальних зондів, встановлених попарно в чотири свердловини на глибину 50 м кожна.

З метою проведення досліджень до складу комплексу включено вимірювальне обладнання та автоматизовану систему управління.

Вимірювальні прилади, до складу яких входять датчики температури і датчики витрати теплоносія, встановлені як у наземній, так і в підземній (підводній) частині комплексу.

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

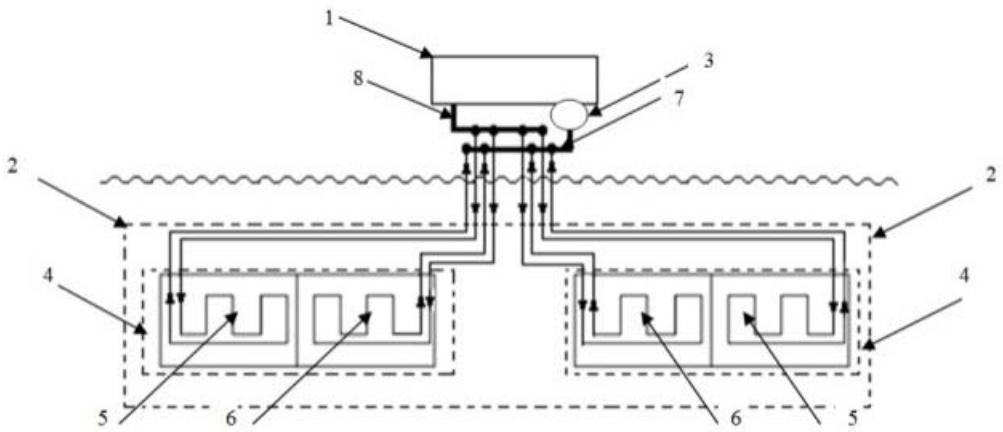

Рис. 2. Загальна схема гідротермальної модульної теплонасосної системи:
1 – тепловий насос; 2 – колектор гідротермальної теплонасосної енергетичної системи;
3 – циркуляційний насос; 4 – гідротермальний зонд; 5, 6 – нижня і, відповідно, верхня труба гідротермального зонду;
7 – гребінка подачі теплоносія;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

Рис. 3. Зовнішній вигляд однієї з панелей колектора гідротермальної теплонасосної системи УкрДГРІ

Датчики температури у наземній частині енергетичної системи встановлені на впускних і випускних трубопроводах всіх контурів, на акумуляторі тепла, на вході і виході датчиків витрати теплоносія. Інформація з датчиків знімалася автоматично, з часовим інтервалом в п'ять секунд.

Для вимірювання витрати теплоносія використовувалися лічильник води фірми SENSUS. Номінальна витрата становить 10 м^3/год і витримує робочий тиск у 16 бар.

До системи підключено шість датчиків витрати теплоносія, чотири на кожній лінії подачі теплоносія в зонди (геотермальний або гідротермальний) і два на загальних магістралях протоку теплоносія по низькотемпературному і високотемпературному контурах наземної частини системи.

Датчики температури, встановлені в підземній частині геотермальної енергетичної системи, дозволяють вимірювати температуру ґрунту на глибинах: 0,02 м; 0,30 м; 0,70 м; 1,20 м; 2,00 м; 5,00 м; 15,00 м; 35,00 м; 50,00 м і температуру теплоносія, як у вертикальній частині ґрунтового колектора на відстані 2,00 м; 5,00 м; 15,00 м; 35,00 м; 50,00 м від поверхні, так і в контрольних точках горизонтальної частини ґрунтового колектора на ділянці між геотермальною свердловиною і входом в будівлю (*Гошовский та Зурьян, 2015*).

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

У геотермальній системі контролером моделі MAXYCON FLEXY та спеціальним програмним забезпеченням, розробленим на базі відкритого конфігуратора FDB фірми RAUT AUTOMATIK, було забезпечено збір даних з вимірювальних пристроїв з можливістю подаль-

шої обробки та запису в архів для їх інтерпретації та виведення на монітор комп'ютера програмою візуалізації у реальному часі (рис. 4). Контролер MAXYCON FLEXY дозволяє знімати показники більш ніж з 36 каналів інформації і дистанційно керувати системою як в автономному, так і ручному режимі.

У гідротермальній системі для прийому і перетворення сигналів, що надходять від термоперетворювачів опору ТСП-204 ТСП-204, в значення температури і відображення їх на вбудованому цифровому індикаторі застосовувався вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів И8 8ТС/10-RS485-БП-12-ИПК-Щ. З метою візуалізації у режимі реального часу даних, отриманих з датчиків, записи їх в архів та відображення отриманих даних у вигляді таблиць або графіків, використовувався індикатор логер И16П RS 485/43-USBGSM-ИПR-Д і програмне забезпечення (система збору даних) РегМік (рис. 5).

а б в

Рис. 4. Основне вимірювальне обладнання, яке використовувалося для проведення експерименту на геотермальній теплонасосній системі:
а – температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204; б – контролер MAXYCON FLEXY;
в – спеціальне програмне забезпечення, розроблене на базі відкритого конфігуратора FDB фірми RAUT AUTOMATIK

а б в

Рис. 5. Основне вимірювальне обладнання, яке використовувалося для проведення експерименту на геотермальній теплонасосні системі:
а – вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів И8 8ТС / 10-RS485-БП-12-ІПК-Щ;
б – індикатор логер І16П RS 485 / 43-USB-GSM-ІПR-Д; в – програмне забезпечення (система збору даних) РегМік

Для виконання порівняльного аналізу теплонасосних енергетичних систем були прийняті критерії, в яких враховані як фізичні параметри, так і техніко-економічні показники теплових насосів (ТН) (*Олийниченко та Марченко, 2017*):

1. Теплова продуктивність (англ. Coefficient of Perfomance, COP).
2. Коефіцієнт перетворення теплової енергії.
3. Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса.
4. Питома вартість на 1 кВт виробленої теплоти.

Основним показником ефективності теплового насоса є коефіцієнт трансформації (**коефіцієнт перетворення теплової енергії**) φ_T:

$$\varphi_T = \frac{Q_1}{N} = \frac{(Q_2 + N)}{N} = \frac{T_2}{(T_2 - T_{11})}, \quad (1)$$

де Q_1 – теплова продуктивність ТН, Вт; N – потужність компресора, Вт; T_2 – температура теплоносія на виході з конденсатора, °К; T_{11} – температура теплоносія на вході у випарник, °К.

Дійсний коефіцієнт трансформації теплового насоса φ може мати вигляд:

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

де η_{TH} коефіцієнт втрат, що враховує реальні процеси, які здійснюються робочим тілом в *ТН*, знаходиться у межах 0,65–0,7 (*Ильин, 2010*).

Теплова продуктивність всієї енергетичної системи по теплу (контуру випарника) і холоду (контуру конденсатора) залежить від витрат теплоносія в одиницю часу та різниці температур на виході і вході системи (по теплу з випарника, по холоду з конденсатора):

$$W = \frac{Vc\Delta T}{3600}, \quad (3)$$

де W – потужність, кВт; c – питома теплоємність теплоносія Вт/(м^3·°С); V – об'єм теплоносія, м^3/год; ΔT – різниця температур на вході та виході із системи, °С.

Експеримент проводився впродовж календарного року. У ході проведення експерименту протягом вказаного періоду попередньо задані параметри контуру конденсатора, відповідно до методики проведення експерименту, не змінювалися.

Тепловий режим ґрунту приповерхневих шарів землі має вікову, багаторічну, річну і добову циклічність, пов'язану зі зміною режимів інсоляції і випромінювання. Головне джерело теплової енергії, що надходить у ґрунт, це сонячна радіація.

Тепловий режим води визначають кілька процесів, які відбуваються одночасно, а саме: сонячна радіація, випаровування, теплообмін з атмосферою, перенос тепла течіями, турбулентне перемішування вод та ін. Зазвичай прогрівання води відбувається зверху вниз.

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

У процесі проведення дослідження на обох енергетичних установках були отримані дані річних змін температур у ґрунті (м. Київ) (рис. 6) і водоймі (р. Козинка) (рис. 7) та показники температури на вході і виході з випарника і конденсатора для кожної теплонасосної системи (рис. 8, 9)

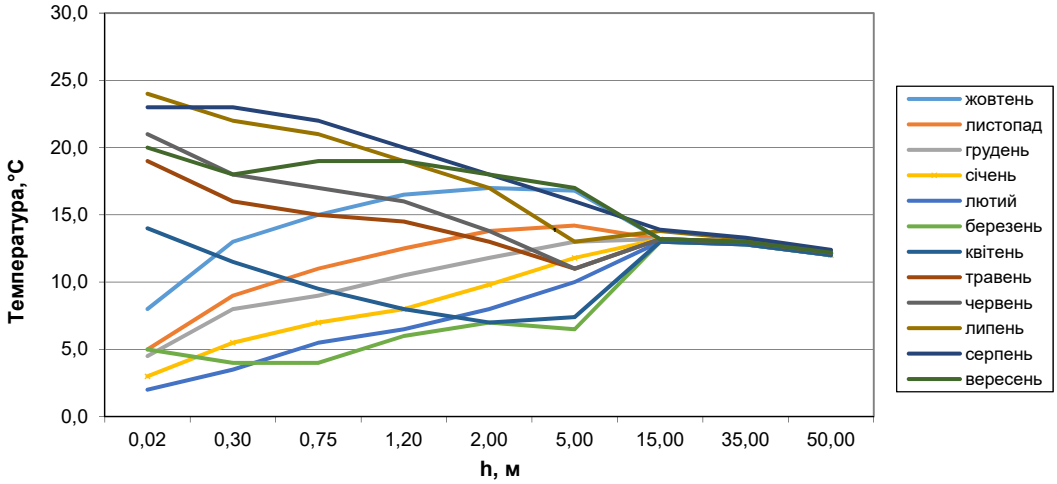

Рис. 6. Експериментально отримані залежності змін середньомісячних температур ґрунту *T* від глибини *h* (м. Київ)

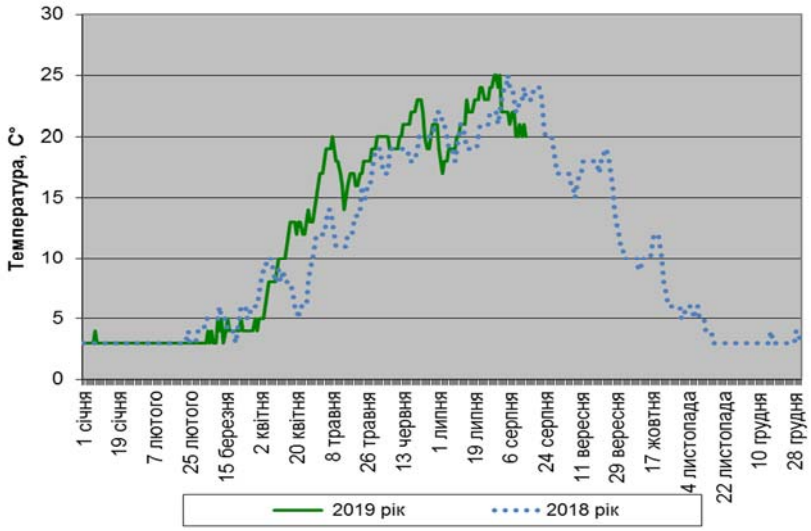

Рис. 7. Експериментально отримані залежності річних змін температури води (р. Козинка)

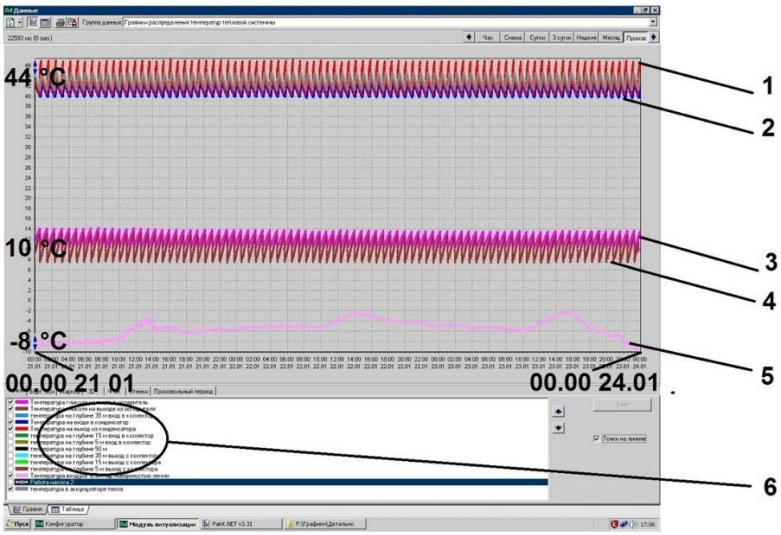

Рис. 8. Відображення показників температури у контрольних точках геотермальної системи системою візуалізації та архівування даних контролера моделі MAXYCON FLEXY і спеціального програмного забезпечення УкрДГРІ, розробленого на базі відкритого конфігуратора FDB фірми RAUT AUTOMATIK:

1 – температура на виході з конденсатора; 2 – температура на вході у конденсатор; 3 – температура на вході у випарник; 4 – температура на виході з випарника; 5 – температура повітря; 6 – перемикач програмних фільтрів та легенда

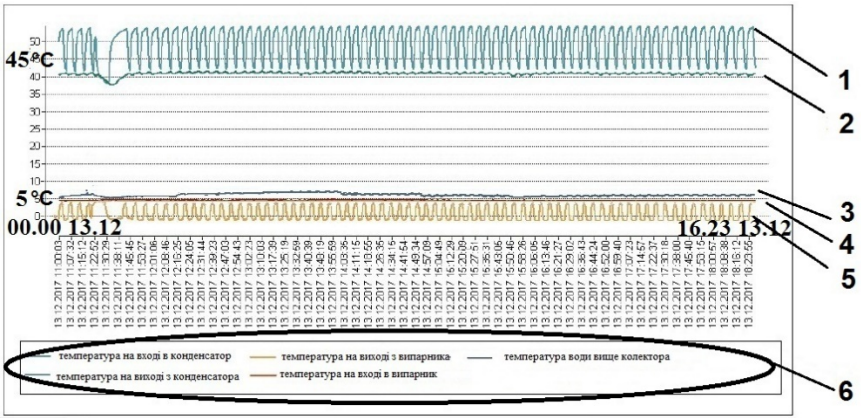

Рис. 9. Відображення показників температури у контрольних точках гідротермальної системи системою візуалізації та архівування даних контролера Peг-Мік:
1 – температура на виході з конденсатора; 2 – температура на вході у конденсатор; 3 – температура води над колектором; 4 – температура на вході у випарник; 5 – температура на виході з випарника; 6 – легенда

На основі експериментально отриманих даних витрат теплоносія у контурі конденсатора і значень температур на вході і виході з конденсатора теплового насоса за формулою (3) було розраховано значення **теплової продуктивності** всієї енергетичної системи у цілому, яка склала 14 кВт по теплу для кожної з систем.

За формулами (1) та (2) були розраховані **коефіцієнти трансформації** для кожної з енергетичних систем для трьох зимових місяців року (табл. 2). З таблиці видно, що геотермальна енергетична система працює стабільно з високим коефіцієнтом трансформації протягом всього опалювального періоду, в той час як ефективність гідротермальної енергетичної системи нижче і її показник змінюється залежно від місяця року.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта трансформації теплонасосної системи від джерела низькопотенційної теплової енергії

Місяць	Коефіцієнт трансформації (φ)	
	геотермальна система	гідротермальна система
Грудень	4,5	4,1
Січень	4,5	3,9
Лютий	4,5	3,7

Діапазон температур ефективної роботи теплового насоса по контуру конденсатора визначається системою опалення будівлі. І ефективність системи обернено пропорційна температурі теплоносія на виході з конденсатора ТН. При проведенні експерименту в обох системах температура на виході їх конденсатора встановлювалася однаковою і становила 40–46 °С.

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 геотермальної енергетичної системи – 8–13 °С, а для гідротермальної енергетичної системи – 5–10 °С.

Питома вартість системи на 1 кВт виробленої теплової енергії геотермальної системи відрізняється від питомої вартості на 1 кВт виробленої теплової енергії гідротермальної системи вартістю монтажу колектора для збору низькотемпературної теплової енергії. Для геотермальної системи вона у цінах 2019 р. становить 20 000 грн, а для гідротермальної 12 000 грн (табл. 3).

Таблиця 3

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

Система	COP	P (кWh)	Термін експлуатації (рік)	Питома вартість на 1 КВт (грн)	Діапазон температур ефективної роботи теплонасосної системи
Геотермальна	4,5	14	30	20 000	8–13
Гідротермальна	3,7–4,1	14	30	12 000	5–10

Висновки

1. Обґрунтовано, що відсутність паливної складової при отриманні теплової енергії гідротермальними теплонасосними системами електроенергії дає позитивний як економічний, так і екологічний ефект.

2. Встановлено, що використання гідротермальних теплонасосних систем з водяним колектором спеціальної конструкції, який має модульну структуру й складається з кількох функціонально пов'язаних водяних зондів, занурених у водойму, дозволяє зберегти природний ландшафт, навколишнє середовище як на стадії будівництва, так і у процесі експлуатації. При експлуатації гідротермальної теплонасосної системи відсутній негативний вплив на якість води. Вона не втрачає початкових природних якостей і може використовуватися для водопостачання населення. Незаперечною перевагою гідротермальних систем є стабільна робота протягом року за рахунок малої девіації температури теплоносія на вході у випарник теплового насосу.

3. Обґрунтовано, що зміна температури води у водоймі є результатом декількох одночасних процесів, таких як сонячна радіація, випаровування, теплообмін з атмосферою, перенос тепла течіями, турбулентним перемішуванням вод та ін.

4. Експериментально встановлено, що оптимальна температура на вході у випарник енергетичної гідротермальної теплонасосної системи з водяним колектором, зануреним на дно водойми на глибину 3 м, становить 5–10°С і відповідає температурі ґрунту на дні водойми, в якій він встановлений, а оптимальна температура на вході у випарник енергетичної геотермальної теплонасосної системи становить 8–13 °С і відповідає температурі ґрунту на глибині від 15 м і глибше.

5. Аналітично обґрунтовано і експериментально підтверджено, що енергетичні теплонасосні геотермальні системи з вертикально встановленим у свердловину на глибину понад 15 м колектором вимагають, порівняно з аналогічними гідротермальними системами, більших початкових інвестицій, і при цьому мають найбільший коефіцієнт перетворення теплової енергії (коефіцієнт трансформації) у зимовий період, рівний 4,5. Аналогічні за потужністю і конструкцією енергетичні гідротермальні системи мають у зимовий період коефіцієнт трансформації від 3,7 до 4,1.

6. Доведено, що застосування енергетичних теплонасосних гідротермальних систем може бути тією оптимальною серединою, при якій ефективність системи фактично дорівнює високим параметрам енергетичних геотермальних теплонасосних систем, при тому, що їх питома вартість на 1 кВт істотно наближатися до недорогих повітряних теплонасосних систем.

7. Отримані в ході дослідження дані мають важливе наукове і прикладне значення для подальшої розробки методики проєктування гідротермальних теплонасосних систем з використанням гідроенергетичного потенціалу малих річок на основі довгострокового прогнозу їх екологічної та економічної ефективності.

Список використаних джерел

Басюк, Т.О. (2011). Моделювання і прогнозування еколого-гідрологічного стану водосховищ малих ГЕС на р. Південний Буг. *Гідрологія, гідрохімія і гідро екологія. Наук. збірник*, 2(23), 148-158.

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). Гідротермальна модульна теплонасосна система. *Патент України №89759 від 25.04.14. Бюл.* 8.

Друкований, М.Ф., Ковальський, В.П. (2017). Переваги застосування теплових насосів в Україні. *ВНТУ,* 5, 61–66.

Елистратов, С.Л. (2011). Комплексное исследование эффективности тепловых насосов. *Автореф. дис. … доктора техн. наук: 01.04.14.* Новосибирск.

Ильин, Р.А. (2010). Новый подход к оценке эффективности тепловых насосов. *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*, 2, 83-87.

Калнинь, И.М. (1996). Техника низких температур на службе енергетики. *Холодильное дело*, 1, 26–29.

Каплун, В.В. (2014). Засади сталого розвитку паливно-енергетичного комплексу України у світлі виконання вимог конвенцій Ріо. *Вісник КНУТД*, 5(79), 64-69.

Кудря, С.О. та ін. (2001). Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. НАН України; Ін-т електродинаміки та ін. Київ.

Накорчевский, К.И. (2010). Грунтовые акумуляторы теплоты и модеорнизация коммунальной теплоенергетики. К.: Наукова думка.

Ободовський, О.Г., Оніщук, В.В., Почаєвець, О.О. (2019). Перспективи використання гідроенергетичного потенціалу на річках басейну Дніпра (на прикладі р. Рось). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(84), 56-62.

Олийниченко, В.Г. Марченко, Е.В. (2017). Сравнительный анализ типов технологического исполнения тепловых насосов. *Материалы XYIII Международной научно-практической конференции "Возобновляемая энергетика и энергоэффективность в XXI столетии", 27-29 сент. 2017, Киев*, 604-609.

Попов, А.В. (2005). Анализ эффективности различных типов тепловых насосов. *Проблемы энергосбережения,* 1-2. Отримано з http://www.energosovet.ru/ stat422.html

Ткаченко, С.Й. Остапенко, О.П. (2009). Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Вінниця: ВНТУ.

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. *Центр учбової літератури*, Київ, 240-261.

Яценко, Л.В. (2017). Определение эффективности использования комбинированных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии. Киев, *Техническая электродинамика,* 34-41.

Яцик, А.В., Стичаковська, Т.О. (2008). Мала гідроенергетика України: стан, соціально-економічні аспекти розвитку, вплив на природне середовище. *Водне господарство*, 6, 11-15.

Boyle, G. (2004). Renewable energy Power for a sustainable future. Oxford: Oxford University Press.

Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002

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.

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

Tidwell, J., Weir, T. (2006). Renewable energy resources. 2nd edition. London: Taylor and Francis.

Referense

Basyuk, T.O. (2011). Modeling and prediction of ecological and hydrological status of small hydroelectric reservoirs on the Southern Bug River. *Scientific collection "Hydrology, hydrochemistry and hydroecology",* 2(23), 148-158. [in Ukrainian]

Goshovskyi, S.V., Zurian, A.V. (2015). Analysis of different sources usage of renewable energy for optimal performance heat pump systems. *Scientific proceedings of UkrDGRI*, 2, 9-20. [in Russian]

Goshovskyi S.V., Zurian O. V. (2014). Hydrothermal modular heat pump system. *Patent Ukrayiny №89759 vid 25.04.14, Bul. 8.* [in Ukrainian]

Drukovanyi, M. F., Kovalskyi, V. P. (2017). Advantages of using heat pumps in Ukraine. *VNTU*, 5, 61–66. [in Ukrainian]

Elistratov, S.L. (2011). Comprehensive study of the efficiency of heat pumps. *Extended abstract of Doctor's thesis*: 01.04.14. Novosibirsk. [in Russian]

Il'in, R.A. (2010). A new approach to evaluating the efficiency of heat pumps. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2, 83-87. [in Russian]

Kalnin, Y.M. (1996). Energy technology in the service of energy. *Holodilnoe delo*, 1, 26–29. [in Russian]

Kaplun, V.V. (2014). The principles of sustainable development of Ukraine's fuel and energy complex in the light of meeting the requirements of the Rio Conventions. *Visnyk KNUTD*, 5(79), 64-69. [in Ukrainian]

Kudrya, S.O. et al. (2001). Atlas of energy potential of renewable and unconventional energy sources of Ukraine. Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine. Kiev. [in Ukrainian]

Nakorchevskij, K.I. (2010). Soil heat accumulators and moderation of communal heat and power engineering. K.: Naukova dumka. [in Russian]

Obodovskyi, O.G., Onishhuk, V.V., Pochayevecz, O.O. (2019). Perspectives of the usage of hydropower potential of the rivers of the Dnipro river basin (on the example of the Ros river). *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 1(84), 56-62. [in Ukrainian]

Olijnichenko, V.G. Marchenko, E.V. (2017). A comparative analysis of the types of technological design of heat pumps. *Materialy XYIII Mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoj konferencii "Vozobnovlyaemaya energetika i energoeffektivnost v XXI stoletii",* 27-29 sent. 2017, Kiev, 604-609. [in Russian]

Popov, A.V. (2005). Comparative analysis of types of technological execution of heat pumps. *Problemy energosberezheniya*, 1-2. Retritved from: http://www.energosovet.ru/stat422.html [in Russian]

Tkachenko, S.J. Ostapenko, O.P. (2009). Steam-compressor heat pump installations in systems of heat supply. Vinnitsa: VNTU. [in Russian]

Fedyanin, V.Ya., Karpov, M.K. (2006). Use of soil heat exchangers in heat supply systems. *Polzunovsky Bulletin*, 4, 98-103. [in Russian]

Shubenko, V.O., Kuharecz, S.M. (2014). Use of low-temperature energy sources and their converters. Prospects for the development of alternative energy in the Polissya of Ukraine. Centr uchbovoyi literatury, Kyiv, 240-261. [in Ukrainian]

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

Yacyk, A.V., Stychakovska, T.O. (2008). Small hydropower of Ukraine: state, socio-economic aspects of development, impact on the environment. *Water Management*, 6, 11-15. [in Ukrainian]

Boyle, G. (2004). Renewable energy Power for a sustainable future. Oxford: Oxford University Press.

Hepbasli, A., Kalinci, Y. (2009). Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1211-1229. https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.002

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.

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

Tidwell, J., Weir, T. (2006). Renewable energy resources. 2nd edition. London: Taylor and Francis.

Надійшла до редколегії 25.05.19

S. Goshovskyi, Dr. Sci. (Techn.), Prof.
E-mail: ukrdgri@ukrdgri.gov.ua
ORCID ID 0000-0002-8312-6244;
O. Zurian, Cand. Sci. (Techn.),
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net,
ORCID ID 0000-0002-2391-1611;
Ukrainian state geological research institute (UkrSGRI)
78A Autozavodska Str., Kyiv, 04114, Ukraine

ENVIRONMENTALLY SAFE USAGE OF HYDROPOWER POTENTIAL BY HYDROTHERMAL POWER SUPPLY SYSTEMS

The article contains the results of scientific research and design work related to environmentally safe usage of hydropower potential of the small rivers of the Dnieper basin. The innovative design solutions for extraction of low-grade heat energy of water and systems for its transformation into energy convenient for consumption were offered. It was established that use of renewable low-grade energy of soil is widely used in environmentally safe and economically sound power systems. At the same time hydropower potential is not widely used in hydrothermal heat pump systems. It was proved that existing hydrothermal systems are not always adjusted to actual operating conditions and object location. The evidence was provided that the scientific approach to development of appropriate configuration of hydrothermal collector, to methodology of their optimal mounting and to efficiency determination depending on operating conditions is quite topical issue. The scientific novelty of the new process approach is use of special design of water collector that has modular configuration and consists of several functionally related water sondes. The efficiency of hydrothermal system was scientifically proved. The paper describes the results of experimental research of efficiency of hydrothermal heat pump system where the low-grade heat energy of water is used as a renewable primary heating energy source for functioning of the heat pump. The authors have developed experimental hydrothermal and geothermal heat pump systems to conduct the research. Both collector and ground section of the system have mounted sensors of temperature, pressure and coolant flow velocity. The software for archiving and visualization of obtained data was developed. The research procedure was developed. As part of study, observation data were received and performance efficiency of geothermal and hydrothermal systems was calculated. The comparative analysis of energy systems depending on used renewable energy source was carried out. The conclusion was made that use of hydrothermal heat pump systems is environmentally safe. The data obtained as part of study have great scientific and applied significance for engineering of heat pump energy systems using hydropower potential of the small rivers.

Keywords: small water power engineering, hydrothermal system, water collector, renewable energy.

С. Гошовский, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: ukrdgri@ukrdgri.gov.ua
ORCID ID 0000-0002-8312-6244
А. Зурьян, канд. техн. наук,
E-mail: alexey_zuryan@ukr.net,
ORCID ID 0000-0002-2391-1611;
Украинский государственный геологоразведочный институт (УкрГГРИ),
ул. Автозаводская, 78А, г. Киев, 04114, Украина

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Приведены результаты научно-исследовательской и конструкторской работы по экологически безопасному использованию гидроэнергетического потенциала малых рек в бассейне Днепра. Предложены и научно обоснованы инновационные конструкторские решения для отбора низкопотенциальной тепловой энергии воды и систем ее преобразования в энергию, удобную для потребления. Установлено, что использование возобновляемой низкопотенциальной энергии грунта для работы геотермальных теплонасосных систем широко применяется в экологически безопасных и экономически выгодных энергетических системах. Вместе с тем использование гидроэнергетического потенциала в гидротермальных теплонасосных системах не имеет широкого применения. Доказано, что существующие гидротермальные системы не всегда адаптированы к условиям эксплуатации и местоположению объекта. Обосновано, что актуальным является вопрос научного подхода к разработке необходимой конфигурации гидротермального коллектора, методологии оптимального его размещения и определения эффективности в зависимости от условий эксплуатации. Научной новизной предлагаемого технологического подхода является использование водяного коллектора специальной конструкции, который имеет модульную структуру и состоит из нескольких функционально связанных между собой зондов. Научно обоснована эффективность гидротермальной системы. В работе приведены результаты экспериментальных исследований эффективности работы гидротермальной теплонасосной системы, где в качестве возобновляемого первичного источника тепловой энергии для работы теплового насоса используется низкопотенциальная тепловая энергия воды. С целью проведения исследований авторами была разработана экспериментальная гидротермальная теплонасосная система и геотермальная теплонасосная система. Установлены датчики температуры, давления и скорости протока теплоносителя как на коллекторе, так и в наземной части системы. Создана компьютерная система архивирования и визуализации полученных данных Разработана методика проведения исследований, в ходе которых получены экспериментальные данные и выполнены расчеты эффективности работы геотермальной и гидротермальной систем. Выполнен сравнительный анализ энергетических систем в зависимости от возобновляемого источника энергии. Сделан вывод, что использование гидротермальных теплонасосных систем является экологически безопасным. Полученные в ходе исследования данные имеют важное научное и прикладное значение при проектировании энергетических теплонасосных систем с использованием гидроэнергетического потенциала малых рек.

Ключевые слова: малая гидроэнергетика, гидротермальная система, водяной коллектор, возобновляемая энергетика.