

О. В. ЗУР'ЯН

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник відділу геотермальної енергетики

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України

ORCID: 0000-0002-2391-1611

ОБГРУНТУВАННЯ ДЕВІАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВИХОДІ З СВЕРДЛОВИНИ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ОСОБЛИВІСТЮ ГІДРОГЕОТЕРМІЧНОГО РЕЖИМУ ЗОВНІШНЬОЇ ОБОЛОНКИ ЗЕМЛІ

В роботі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо обґрунтування місця розташування свердловин гідротермальної теплонасосної системи для стабільного та ефективного отримання низькопотенційної геотермальної енергії. Доведено, що найбільш ефективними є теплонасосні системи які використовують тепло ґрунту або ґрунтових вод та мають теплообмінники та свердловини встановлені на глибину нижче нейтрального шару. Наведено ендегенні та екзогенні фактори, що впливають на глибину залягання нейтрального шару. Визначено, що екзогенні фактори в порівнянні з ендегенними мають більший вплив на формування термічного режиму гідросфери. Наведено загальні закономірності зміни термічного режиму гідросфери що перебуває під впливом екзогенних факторів. Обґрунтовано, що в залежності від гідрогеологічних умов, зони розташування свердловин геотермальної теплонасосної системи, нижче теоретично визначеної глибини нейтрального шару можуть повторно утворюватися зони з суттєвою девіацією температури ґрунту. Визначені критерії що визначають тип гідрогеотермічного режиму та наведено класифікацію типів гідрогеотермічного режиму.

Представлено розроблену і сконструйовану в Інституті відновлюваної енергетики НАН України експериментальну теплонасосну систему, яка складається з теплового насосу та двох свердловин, через які забезпечується циркуляція води від підземного горизонту до теплового насосу. В свердловині та на поверхні встановлені температурні датчики. Розроблено методику проведення досліджень.

Наведено результати експериментальних досліджень на підставі яких встановлено, що за рахунок особливих геоморфологічних умов ділянки розташування системи, температура води в водоносному горизонті (на глибині 50 м) залежить від температури повітря та інтенсивності сонячної інсоляції протягом дня. Доведено, що між водоносним горизонтом розкритим свердловинами та розташованими рядом ставками в балках є гідравлічний зв'язок, а незначна відстань між ними та особливий рельєф місцевості впливають на зміну температури води в свердловині глибиною 50 м.

Викладено основні закономірності впливу поверхневих гармонійних змін температури на режим температури зовнішньої оболонки Землі. Наведена класифікація в якій враховуються усі можливі основні типи гідрогеотермічного режиму.

Отримані в ході дослідження результати мають важливе наукове і прикладне значення при проектуванні геотермальних та гідротермальних теплонасосних систем. Крім того мають перспективу подальші дослідження можливостей та ефективності використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплоти для стабільної генерації енергії від відновлюваних джерел незалежно від кліматичних умов і пори року.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, геотермальна енергія, гідротермальна енергія водоносний горизонт, нейтральний шар, тепловий насос, водозабір, теплота ґрунту, ґрунтові води.

O. V. ZURIAN

Candidate of Engineering Sciences,

Senior Research at the Department of Geothermal Energy

Institute of Renewable Energy

of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID: 0000-0002-2391-1611

JUSTIFICATION OF THE TEMPERATURE DEVIATION OF THE HEAT CARRIER AT THE OUTLET OF THE WELL OF THE GEOTHERMAL HEAT PUMP SYSTEM AS A FEATURE OF THE HYDROGEOHERMAL REGIME OF THE EARTH'S OUTER SHELL

The paper presents the results of theoretical and experimental research on the justification of the location of the wells of the hydrothermal heat pump system for stable and efficient production of low-potential geothermal energy. It has been proven that the most effective are heat pump systems that use the heat of the soil or groundwater and have heat exchangers and wells installed at a depth below the neutral layer. Endogenous and exogenous factors affecting the depth

of the neutral layer are given. It was determined that exogenous factors compared to endogenous factors have a greater influence on the formation of the thermal regime of the hydrosphere.

The general regularities of changes in the thermal regime of the hydrosphere under the influence of exogenous factors are given. It is substantiated that, depending on the hydrogeological conditions, the zones where the wells of the geothermal pump system are located, below the theoretically determined depth of the neutral layer, zones with a significant deviation of the soil temperature may re-form. The criteria determining the type of hydrogeothermal regime are determined and the classification of types of hydrogeothermal regime is given.

An experimental heat pump system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine is presented, which consists of a heat pump and two wells through which water circulates from the underground horizon to the heat pump. Temperature sensors are installed in the well and on the surface. Research methods have been developed.

The results of experimental studies are presented, based on which it was established that due to the special geomorphological conditions of the location of the system, the water temperature in the aquifer (at a depth of 50 m) depends on the air temperature and the intensity of solar insolation during the day. It has been proven that there is a hydraulic connection between the aquifer opened by the wells and the ponds located in a row in the beams, and the small distance between them and the special topography of the area affect the change in the temperature of the water in the well 50 m deep.

The main regularities of the effect of surface harmonic temperature changes on the temperature regime of the Earth's outer shell are outlined. The classification is given, which takes into account all possible main types of hydrogeothermal regime.

The results obtained during the research have important scientific and applied significance in the design of geothermal and hydrothermal heat pump systems. In addition, further research into the possibilities and effectiveness of using the aquifer as a natural heat accumulator for stable energy generation from renewable sources regardless of climatic conditions and seasons is promising.

Key words: renewable energy sources, geothermal energy, hydrothermal energy aquifer, neutral layer, heat pump, water intake, soil heat, groundwater.

Постановка проблеми

Питання переходу на безвуглецеву технології та відновлювану енергетику є актуальним у зв'язку зі зростанням світового споживання енергії та зростанням викидів парникових газів, особливо вуглекислого газу. За даними Всесвітньої організації охорони природи (World Wildlife Fund, (WWF)), енергетика є найбільшим джерелом викидів парникових газів, що сприяє глобальному потеплінню і зміні клімату на Землі. Перехід на безвуглецеві технології та відновлювану енергетику має на меті зменшити залежність від викопного палива та зменшити викиди парникових газів, що допоможе зберегти природні ресурси та зменшити вплив на довкілля. Крім того, перехід на відновлювану енергетику може зменшити залежність країн від імпорту нафти та газу та сприяти розвитку нових технологій та ринків. Таким чином, перехід на безвуглецеві технології та відновлювану енергетику є необхідним кроком для збереження довкілля та забезпечення сталого розвитку людства.

Ще однією важливою умовою застосування відновлювальних джерел енергії, яка набула значення у наслідок воєнної агресії росії проти України, стала актуальність питання переходу на децентралізовані системи опалення та електропостачання. Для окремих поселень, малих містечок, та окремих районів великих міст оптимальним у цьому випадку є застосування систем опалення та кондиціонування з використанням теплових насосів типу вода-вода, або вода-повітря. В якості відновлюваного джерела енергії в яких економічно та конструктивно доцільно використовувати теплову низько потенційну енергію води з свердловини якою розкрито водоносний горизонт.

Відомо, що ефективність та стабільність роботи теплового насоса залежить від температури та дебіту теплоносія на вході до його випарника. Тому актуальною задачею на стадії проектування даних систем є прогнозування можливих змін показників даних параметрів протягом прогнозованого часу роботи системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі описані приклади успішної реалізації геотермальних теплонасосних систем у будівлях різного типу та масштабу. Наприклад, в роботі [1, 2] автори виконали аналіз геотермального потенціалу Литви та інших держав з урахуванням щільної забудови урбанізованих територій та можливість використання геотермальних теплонасосних систем для опалення та охолодження публічних будівель. Перспективи застосування теплових насосів в Україні досліджені в роботах [2, 3, 4]. Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України виконано в роботі [5]. Проводяться активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності акумулювання тепла та холоду шляхом використання води підземних горизонтів [6, 7]. Разом з тим, зважаючи на те, що у теплонасосній системі що в якості теплоносія використовує воду з водоносного горизонту розкритого свердловиною в якості колектора для забору низькопотенційної теплової енергії виступає природне середовище (водоносний горизонт), а не технічний пристрій (теплообмінник), актуальними залишаються питання дослідження надійності та стабільності отримання необхідних параметрів температури та дебіту для ефективної роботи тепло насосної системи в залежності від

місця її встановлення, та розробки науково-технічних засад проектування даних систем в цілому. З практичної точки зору науковий інтерес викликають дослідження що враховують реальні умови розміщення даних систем. Тому виникла потреба продовження проведених в [8, 9] досліджень, що зроблено у даній статті.

Формулювання мети дослідження

Тепловий режим поверхні Землі, ґрунту та земної кори обумовлений сумарною сонячною радіацією та теплоти висхідного до поверхні ґрунту із глибин Землі, визначає температуру підземних вод, яка коливається в широких межах від негативної (переохолоджені солоні води до перевищуючої 100 °С (перегріті води гейзерів). Води м найнижчими температурами зустрічаються в області вічної мерзлоти, з найбільш високими – в області молодої вулканічної діяльності і районах де підземні води по тектонічним розломам і тріщинам піднімаються з великих глибин земної кори. У свою чергу підземні води самі є одним із важливих факторів теплообміну, що протікає в земній корі, оскільки термічні властивості гірських порід залежать від вологості та руху в них різного роду рідин.

Рух води в земній корі, гірських породах, що її складають, як відомо, може відбуватися під впливом гідравлічного градієнта (ламінарна і турбулентна фільтрація), під дією капілярних сил, осмосу, розчинених газів, температурного градієнта, конвекції і т.д. Причому часто в теплообміні беруть участь не один а декілька видів руху вологи одночасно. Тому питання формування температури підземних вод є нині ще недостатньо відомим, що потребує подальшого вивчення при гідрогеологічних та теплофізичних дослідженнях різних видів підземних вод земної кори.

Метою роботи є шляхом аналізу експериментально отриманих даних добової зміни температури води в свердловині глибиною 50 м, та теоретичного обґрунтування можливості девіації температури ґрунту нижче нейтрального шару під впливом як ендегенних так і екзогенних факторів, визначити можливі зміни теплотехнічних параметрів свердловини, які можуть негативно впливати на ефективність роботи геотермальної теплонасосної системи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Відповідно до поставленої мети дослідження були вирішені такі завдання: по-перше – проведено аналіз експериментально отриманих даних температури води у водоносному горизонті розкритого свердловинами, що входить до складу геотермальної теплонасосної системи Інституту відновлюваної енергетики НАН України; по-друге, обґрунтовано, що екзогенні фактори в порівнянні з ендегенними мають більший вплив на формування термічного режиму гідросфери; по-третє обґрунтовано, що девіація температури теплоносія на виході з свердловини залежить від типу гідрогеотермічного режиму, та наведено класифікацію, яка враховує усі можливі основні типи гідрогеологічного режиму; по-четверте, визначено можливі зміни гідрологічних параметрів свердловини, які можуть негативно впливати на ефективність роботи геотермальної теплонасосної системи

Експериментальна геотермальна теплонасосна система Інституту відновлюваної енергетики НАН України (типу ГЦС – геотермальна циркуляційна система), є теплообмінним пристроєм, який складається із двох свердловин (№ 1 та № 8), поєднаних трубопроводами для циркуляції підземних вод між водоносним горизонтом та будівлею Інституту де встановлено тепловий насос (Рис. 1). Детальний опис системи та геоморфологічні й гідрогеологічні особливості місця її розташування наведено в роботі [9].

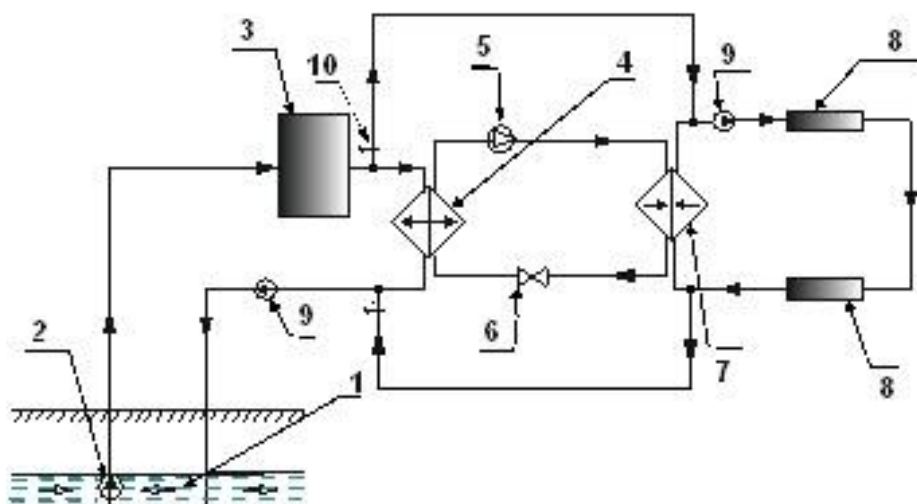


Рис. 1. Принципова схема експериментальної геотермальної теплонасосної системи: 1 – водоносний горизонт; 2 – насос свердловинний; 3 – бак-акумулятор; 4 – випарник теплового насосу; 5 – компресор теплового насосу; 6 – терморегулюючий вентиль теплового насосу; 7 – конденсатор теплового насосу; 8 – фанкойл; 9 – циркуляційний насос; 10 – запірна арматура

Для вимірювань температури в контрольних точках використовувалися температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204. Термоперетворювачі опору ТСП-204 внесені до Державного реєстру засобів виміральної техніки України, за номером У246-07. Робочий діапазон вимірюваних температур від -40 до $+270$ °С, показник теплової інерції не більше 6 сек. Датчики були встановлені в свердловину на глибину 29 м, 34 м, 39 м, 42 м (датчик на глибині 42 м при статичному рівні води в свердловині 40 м, знаходиться у воді нижче дзеркала води на 2 м). Крім того системою моніторингу температури виконувалася вимірювання температури повітря датчиком розташованим на висоті 2 м над гирлом свердловини.

Для прийому, перетворення сигналів в значення температури та їх відображення, застосовувався вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів І8 8ТС/10-RS485-БП-12-ІПК-Щ (Рис. 2).

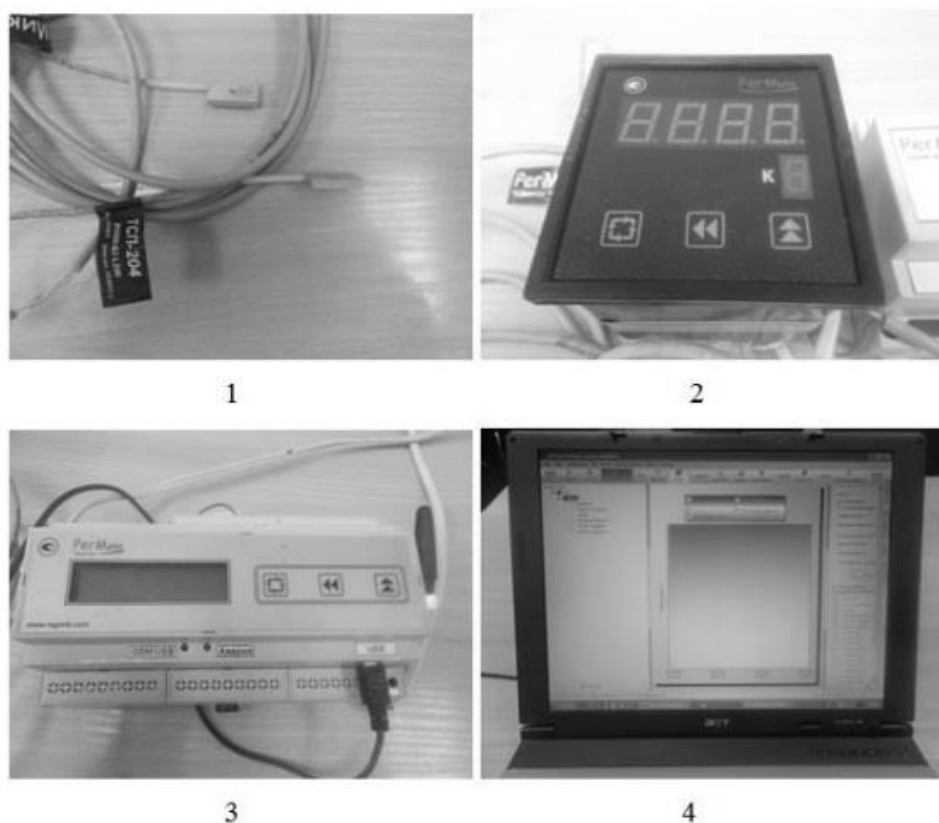


Рис. 2. Вимірювальне обладнання, яке використовувалося для проведення експерименту:
1 – температурні датчики (термоперетворювачі опору) ТСП-204; 2 – вимірювач восьмиканальний з блоком розширення аналогових входів І8 8ТС/10-RS485-БП-12-ІПК-Щ; 3 – індикатор логер І16П RS 485/43-USB-GSM-ІПР-Д; 4 – програмне забезпечення (система збору даних) РегМік

З метою візуалізації даних в режимі реального часу, записи їх в архів та відображення даних у вигляді таблиць або графіків, використовувався індикатор логер І16П RS 485/43-USBGSM-ІПР-Д і програмне забезпечення (система збору даних) РегМік.

Аналіз накопичених спостережень даних температури води в свердловині, якою розкрито водоносний горизонт, виявив тенденцію відхилення від лінійного тренда температур води в свердловині [9], що дозволяє припустити наявність річної компоненти в варіаціях цих характеристик, а прямий кореляційний зв'язок між варіаціями температур повітря і води в свердловині свідчать про вплив сезонних атмосферних змін температур на глибинах залягання водоносного горизонту [10]. Окремі результати вимірювання температур в свердловині та температури води водоносного горизонту наведені на рис. 3.

На графіку (рис. 3) чітко видно прямий кореляційний зв'язок між варіаціями температур повітря і води в свердловині. При чому треба зазначити, що експеримент однозначно показує, що максимум температури води в свердловині фактично припадає на мінімум температури повітря, це свідчить наявності певної затримки в передачі теплоти від джерела до місця встановлення датчика. А подальше проведення досліджень температурного режиму на свердловинах, що знаходяться поблизу теоретично можуть показати хвилеподібне розповсюдження теплоти з зсувом по фазі максимумів показників температури води у свердловині в залежності від місця розташування джерела живлення водоносного горизонту який розкрито даною свердловиною. В той же час відсутність на

даному проміжку часу кореляційного зв'язка температури в контрольних точках між трубного простору з температурою повітря підтверджує ствердження, що теплота розповсюджується з водою швидше, чим в водотривкому шарі, що оточує водоносний горизонт.

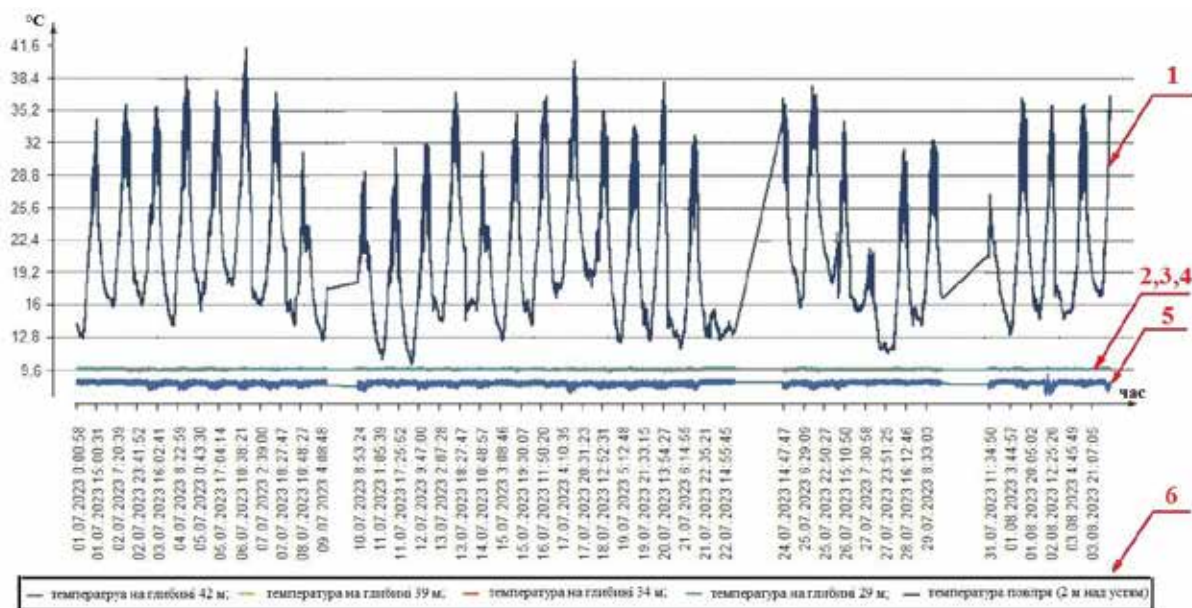


Рис. 3. Візуальне відображення на екрані монітору графіка залежності температур від часу в контрольних точках свердловини системою моніторингу геотермальної теплонасосної системи ІВЕ НАНУ:
1 – температура повітря; 2, 3, 4 – температури в свердловині на глибині 39, 34 та 29 м; 5 – температура в свердловині на глибині 42 м (при статичному рівні води в свердловині 40 м, знаходиться у воді нижче дзеркала води на 2 м); 6 – легенда системи моніторингу

Теоретично можна припустити, що фактичні значення температури можуть бути не точними, разом з тим важливим є що сама тенденція змін температури зберігається і повторюється при багаторазових експериментальних дослідженнях з використанням різних приладів вимірювання та контролерів для інтерпретації, візуалізації та передачі даних що при цьому були використані. Виникає питання необхідності аналітичного підходу, як до інтерпретації отриманих даних, так і їх обґрунтування.

Для перевірки отриманих результатів та визначення зміни значень температури та води нижче нейтрального шару температур було використано математичний апарат викладений в роботі [11] та систематизовано закономірності формування гідрогеотермічного режиму в просторі та часі.

Відомо, що термічний режим гідрогеосфери знаходиться під переважним впливом екзогенних факторів, роль яких у термічному режимі значно зростає у зв'язку з єдністю глобальних процесів теплообміну з кругообігом води в природі. Відомий вплив швидкоперіодичних кліматичних коливань (добових, річних) на – температурний режим земної кори, а також відкриття багаторічних та багатовікових кліматичних змін, що викликають періодичне існування багаторічної мерзлоти на Землі, послужили основою для розробки теорії гідрогеотермічного режиму з урахуванням впливу на температурний режим глибоких надр Землі Приплив позаземної енергії приблизно на чотири порядки вище теплового потоку з надр. Основним джерелом позаземної енергії є тепло Сонця.

Зважаючи на те, що величина припливу радіаційного тепла до Землі змінюється в часі, змінюється і температура зовнішньої оболонки Землі. Вплив поверхневих гармонійних змін температури на режим температури зовнішньої оболонки Землі підпорядковується наступним основним закономірностям.

1. Період коливань температур (добовий, річний тощо) залишається без змін на різних глибинах.

2. Амплітуди температур зменшуються в геометричній прогресії зі збільшенням глибини а арифметичній (перший закон Фур'є). Амплітуда температури зменшується з глибиною за експоненційним законом:

$$\Delta t_x = 2\Delta t e^{-Kx}, \tag{1}$$

де K – коефіцієнт загасання температурної хвилі: (K_1) – в умовах молекулярного теплообміну; K_2 – в умовах інфільтрації; Δt_x – зміна температури на глибині x ; Δt – амплітуда температури на поверхні Землі.

3. Інтенсивність загасання коливань температури із глибиною збільшується із зменшенням періоду коливань. При цьому настання екстремальних значень температури на глибині по відношенню до цих значень на поверхні Землі запізнюється на час, пропорційне глибині і кореню квадратному з періоду (другий закон Фур'є).

4. Відношення глибин загасання відповідних температурних амплітуд різних періодів дорівнює кореню квадратному з відношення періодів цих коливань (третій, закон Фур'є).

Аналіз температурного режиму верхніх шарів земної кори – комплексне завдання і вирішення її неможлива без аналізу закономірностей режиму температури гірських порід і підземних вод, що насичують їх у сукупності, оскільки передача тепла здійснюється в надрах в основному двома шляхами – теплопровідністю та конвекцією. Молекулярна теплопровідність має вирішальне значення в тому випадку, коли в породах немає помітних переміщень води, що характерно для щільних водостійких порід (глини, важкі суглинки, щільні кристалічні породи). За наявності рухомих підземних вод, що має місце в добре проникних породах, представлених пісками, тріщинуватими вапняками, пісковиками, вирішальне значення в передачі тепла набувають конвекційні процеси, роль яких зростає зі зростанням швидкості фільтрації.

У зв'язку з цим в даний час типи гідрогеотермічного режиму можна класифікувати, за двома ознаками – за глибиною загасання фактичних річних амплітуд температур, а також характером загасання річної температурної хвилі. В обох випадках можна виділити два класи. У першому – закриті та відкриті системи, а у другому – системи з експоненційним та інверсійним загасанням температурної хвилі.

З урахуванням обох ознак (глибини та характеру загасання температурної хвилі) складено класифікацію, в якій враховуються всі можливі основні типи гідрогеотермічного режиму (рис. 1) [11].

Експоненційний тип гідрогеотермічного режиму – це режим, при якому зміна температури гірських порід і підземних вод, що їх насичують, описується першим законом Фур'є (амплітуди температури зменшуються в геометричній прогресії при збільшенні глибини в арифметичній прогресії). Такий тип режиму може формуватися як за умов молекулярного теплообміну, і при молекулярно-конвективному теплообміні за наявності інфільтрації. Різниця полягає лише в тому, що в першому випадку потужність шару фактичних річних змін температури визначається теплофізичними властивостями гірських порід і збігається з глибиною залягання нейтрального шару (закритий тип гідрогеотермічного режиму), а в другому – швидкістю інфільтрації. У зв'язку з чим потужність шару змінних температур завжди перевищує глибину залягання нейтрального шару (відкритий тип гідрогеотермічного режиму). У першому випадку ми маємо справу з експоненційно-закритим типом гідрогеотермічного режиму, а в другому – з експоненційно-відкритим.

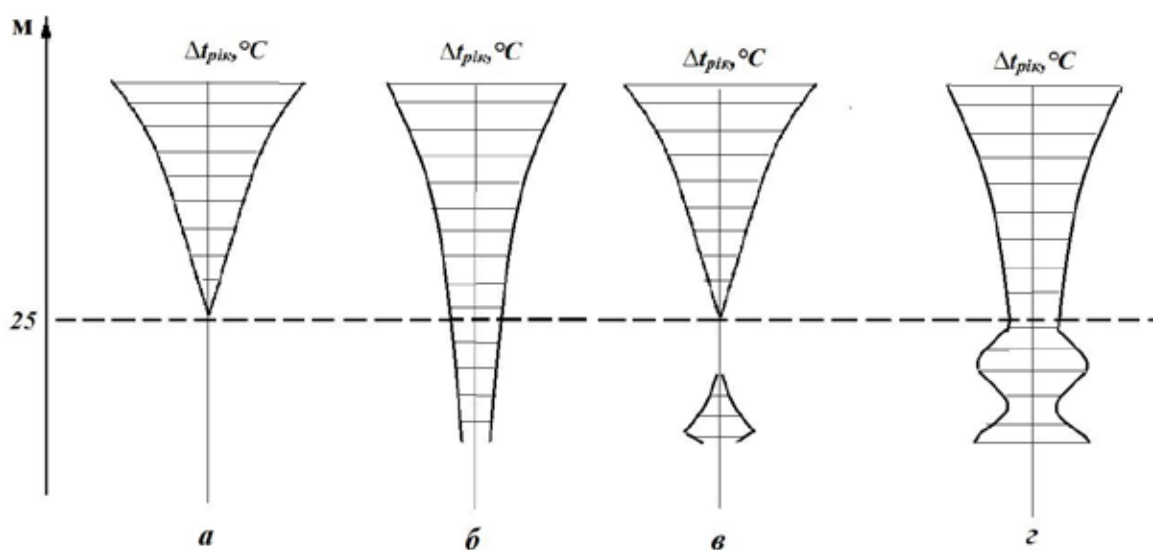


Рис. 4. Основні типи гідрогеотермічного режиму: а – експоненційно-закритий; б – експоненційно-відкритий; в – інверсійно закритий; г – інверсійно-відкритий [11]

Експоненційно-закритий тип гідрогеотермічного режиму, спостерігається на ділянках, складених щільними водотривкими породами (глини), в яких підземні води присутні головним чином у зв'язаному стані та рух їх вкрай уповільнено. Тому температурний режим у районах, складених водотривкими породами, визначається в основному їхньою молекулярною теплопровідністю. Цей тип гідрогеотермічного режиму має спостерігатися у внутрішньоконтинентальних районах, складених потужними товщами водостійких порід, у разі неглибокої ерозійної розчленованості. У таких районах температура порід нижче за «нейтральний шар» протягом року відрізняється стабільністю.

Розподіл температури на будь-якій глибині та на будь-який момент часу з урахуванням поверхневих гармонійних коливань температури визначається рівнянням Фур'є:

$$t_x = t_{nc} + \Delta t e^{-xk_1} \sin \left(\frac{2\pi t_1}{\tau} - x \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}} \right) \quad (2)$$

де t_x – температура на глибині x , °C; t_{nc} – температура «нейтрального шару», °C, t_1 – час після «нульового часу», с.

Оскільки в момент настання екстремальних температур синус правої частини цього рівняння дорівнює одиниці, зміна температур (максимальна) на будь-якій глибині за будь-який період можна визначити за допомогою виразу (1), з якого видно, що потужність шару залежить не тільки від періоду коливань, але так само від температуропровідності порід, амплітуди на поверхні та заданої точності вимірювань температури. Проте у районах складених водотривкими породами, глибина згасання температурної хвилі варіює у значних межах переважно під впливом зміни періоду коливань, оскільки основні параметри змінюються у досить вузьких межах.

Велике значення в теорії та практиці гідрогеотермічних досліджень мають температура та глибина залягання так званого «нейтрального шару», під яким розуміють глибину залягання шару постійних річних температур.

Теоретично, за відсутності конвекції, його потужність може коливатися від 7,6 до 38,2 м. Однак для верхніх шарів Землі, представлених переважно глинами, суглинками значення між крайніми значеннями глибин насправді може коливатися від 14 до 20 м, що підтверджується експериментально.

За експериментальними даними температурна хвиля із надр Землі загалом запізнюється приблизно 20–30 днів із збільшенням глибини за кожен метр. Тому на глибині 5 м, наприклад, у північній півкулі мінімальна температура спостерігається у липні, а максимальна – у січні. За прогнозних оцінок величина відставання температурної хвилі визначається аналітично.

Найбільш детально в натурних умовах вивчено температурний режим верхньої частини шару молекулярних річних теплообігів до 1,6–3,2 м, оскільки саме до цих глибин ведуться багаторічні спостереження.

Температура «нейтрального шару» в умовах закритого типу режиму, залишаючись постійною протягом року, змінюється, підкоряючись багаторічним циклам. На жаль, обсяг таких матеріалів дуже обмежений як за кількістю точок спостережень, і за тривалістю самих спостережень.

Зіставлення даних про режим сонячної активності та режим температури ґрунту показує, що хоча циклічність сонячної активності позначається на температурі поверхні Землі безпосередньо, в цілому ця залежність виявляється складнішою, ніж здається на перший погляд.

Так, закономірності живлення підземних вод прямо майже не залежать (як температура) від сонячної радіації, а залежать, перш за все, від режиму опадів, який у свою чергу зумовлений циклічністю характеру циркуляції атмосфери і лише остання пов'язана складною залежністю з циклічністю сонячної активності. Саме тому довгий час не вдавалося пояснити причини асинхронності в режимі рівня ґрунтових вод щодо циклічності сонячної активності за наявності тісного емпіричного зв'язку між цими двома факторами.

Повертаючись до характеристики режиму температури глибших шарів, нагадаємо, що зі збільшенням тривалості та давності циклу зменшується його вплив на температуру поверхневих шарів, але зростає вплив на глибші шари. Багаторічні цикли через порівняно невелику амплітуду поверхні проникають загалом на незначну глибину.

Експоненційно-відкритий тип гідрогеотермічного режиму – це такий тип режиму, коли потужність шару фактичних річних змін температури перевищує глибину залягання «нейтрального шару», але температурні хвилі згасають за експонентом (перший закон Фур'є). Відколи були поставлені спеціальні спостереження за режимом, рідко вдавалося виявити ділянки, де б цього не спостерігалось. Раніше дослідники, виявляючи при повторних вимірах у свердловинах зміни температури нижче «нейтрального шару», пояснювали це похибками апаратури, недоліками методики вимірювання або різними факторами, що спотворюють [11].

Зміна річних температурних хвиль лише на рівні «нейтрального шару» відбувається у тому разі, коли верхні від Землі шари складені непроникними породами. За наявності зверху більш менш потужних пачок проникних порід картина різко ускладнювалася. Величина і глибина загасання температурних амплітуд залежить не тільки від температуропровідності порід і періоду температурних коливань, а головним фактором є швидкість інфільтрації підземних вод, яка залежить від величини живлення. Вона особливо велика поблизу поверхневих водойм та водотоків. Необхідно враховувати, що і за межами водойм і водотоків сума опадів, що обчислюється кліматологами, зовсім не говорить про те, що на кожній даній ділянці пропорційна кількість вологи проникає в поверхневі шари. Відбувається колосальне за своїми масштабами перерозподіл вологи у верхніх шарах Землі. На великих площах суші з особливостей геолого-гідрогеологічної побудови, інфільтрацію може йти лише незначна частина опадів. На інших ділянках при перерозподілі водних мас і сприятливих геолого-гідрогеологічних умовах може створюватися багаторазова «перевага» вод, що інфільтруються. Тому не можна приймати як максимальну швидкість інфільтрацій середні або навіть максимальні цифри, що характеризують розподіл опадів на поверхні Землі.

В процесі багаторічного вивчення режиму температури верхніх шарів земної кори, в натурних умовах було встановлено, що в районах, складених від поверхні Землі водопроникними породами, потужність шару річних змінних температур суттєво зростає і не ув'язується з даними, одержуваними аналітичним шляхом на базі вирішення диференціального рівняння, яке описує передачу тепла лише молекулярною теплопровідністю.

При просочуванні атмосферних вод, а також вод з поверхневих водойм та водотоків, глибина і швидкість проникнення температурних хвиль виявляються значно більшими, ніж у водотривких породах. Якщо в останньому випадку теплообмін відбувався лише завдяки молекулярній теплопровідності порід, то при інфільтрації перенесення тепла здійснюється, крім того, з масою води, що рухається, тобто, шляхом конвекції. Райони саме з такими умовами належать до *відкритого типу гідрогеотермічного режиму*. Спостерігається він там, де верхні земні шари, кори складені добре проникними і дренажними породами (з глибокою ерозійною розчленованістю).

Є кілька рішень диференціального рівняння, що враховує передачу тепла кондуктивним шляхом і конвекцією, а також поверхневі синусоїдальні зміни температури. Найбільш суворе їх рішення. Р. В. Столлмана

$$t_x = t_{nc} + \Delta t e^{-xk_1} \sin\left(\frac{2\pi t_1}{\tau} - Bx\right)$$

$$\text{де } B\Delta = \left[(M^2 + N^4)^{1/2} - N^2 / 2 \right]^{1/2}; \quad M = \frac{\pi c p}{\lambda \tau}; \quad N = \frac{v c_o p_o}{2\lambda}. \quad (3)$$

Рішення отримано для таких граничних умов:

1. Температура на поверхні Землі

$$t_x = t_{nc} + \Delta t \sin 2\pi t_1 / \tau$$

Де t_B – температура повітря

2. При $x = \infty$ температура не залежить від поверхневих коливань температури.

Ці граничні умови добре задовольняють рівняння в частині $0 < x < \infty$ та $0 < t_1 < \infty$. Застосовується рішення за таких умов: рідина рухається постійно і рівномірно вздовж осі x ; теплові характеристики середовища та рідини, постійні у просторі та в часі. Температура води в кожній точці інтервалів дорівнює температурі порід. Оскільки при максимумі амплітуди синус правої частини рівняння (3) дорівнює одиниці, то за аналогією з традиційними прийомами, які застосовуються в молекулярній теплопровідності, загасання температурної хвилі можна визначити за допомогою виразу (1). Розрахунки згасання добової та річної температурних хвиль показують, що глибини згасання, як і слід очікувати, збільшуються загалом із зростанням швидкості фільтрації та зменшенням температуропровідності скелета порід

Інверсійний тип гідрогеотермічного режиму це особливий тип гідрогеотермічного режиму при якому поверхневі температурні амплітуди передаються пластом від зон живлення і характеризується після згасання повторною появою на більшій глибині амплітуд температури з тим же періодом.

Таке згасання (експоненціальне) відбувається лише в однорідному геолого-гідрологічному середовищі. А оскільки гідрогеосфера насправді шарувата і дуже неоднорідна як за складом гірських порід, так і за їх фільтраційними властивостями, то і відповідний характер загасання температурних хвиль в реальних умовах спостерігається насправді рідко. Оскільки під слабопроникними гірськими породами можуть залягати породи з більш високими фільтраційними властивостями, то за наявності зв'язку в таких порід з поверхневим водотоком або водоймою через них температурні хвилі проникають у надра Землі латерально на відстань, що визначається в основному швидкістю інфільтрації. Це і є причиною формування інверсій у гідрогеотермічному режимі, коли температурні амплітуди після загасання повторно спостерігаються у глибших, але більш водопроникних шарах.

Таким чином, якщо в гірських породах після згасання її амплітуда збільшується повторно, то такі породи містять водоносний шар, що має за межами точки спостережень безпосередній зв'язок з поверхнею Землі, з якою він латерально обмінюється (через область живлення) вологою та теплом (Рис. 5).

У світлі цього гідрогеосфера постає насправді як шарувато-неоднорідна система щодо термічного режиму у зв'язку з чим її геотемпературне поле необхідно розглядати як нестационарне. Раніше, як ми бачили, ця система приймалася як однорідна щодо термічного режиму, а геотемпературне поле як стаціонарне чи квазістаціонарне. Оскільки потужність зони активного водообміну гідрогеосфери, у межах якої інверсії поширені повсюдно, перевищує всюди на континентах глибину залягання «нейтрального шару».

Загалом глибина поширення інверсій (у річному циклі) корелює із потужністю зони активного водообміну гідрогеосфери. З огляду на це можна з упевненістю стверджувати, що річні інверсійні зміни температури поширюються у водоносних горизонтах зони активного водообміну практично на всьому міжріччі.

Клас «інверсійний тип гідрогеотермічного режиму» можна розділити на два підкласи: *інверсійно-закритий* тип гідрогеотермічного режиму та *інверсійно-відкритий* тип гідрогеотермічного режиму.

Інверсійно-закритий тип гідрогеотермічного режиму спостерігається на ділянках, складених товщею водостійких і водопроникних порід, що перешаровуються, з наявністю у верхній частині розрізу водотривкого шару потужністю понад 40–50 м, що характерно для артезіанських басейнів, приурочених до геоструктурних западин. Річні зміни температури в таких районах у межах верхнього водотривкого шару спочатку загасають так само,

як і в районах з експоненційно-закритим типом гідрогеотермічного режиму. Але потім, нижче за глибиною амплітуди, знову чітко реєструються, коли вимірювання проводяться в межах водоносного пласта, що має область живлення на поверхні Землі, з якою він постійно обмінюється вологою та теплом. Стратосфера майже повсюдно представлена товщею водотривких глин і водопроникних порід що перешаровуються. У цих умовах схема гідрогеотермічного режиму у розрізі представляє собою чергування по вертикалі зон постійних річних температур із зонами, де реєструються зміни температури протягом року.

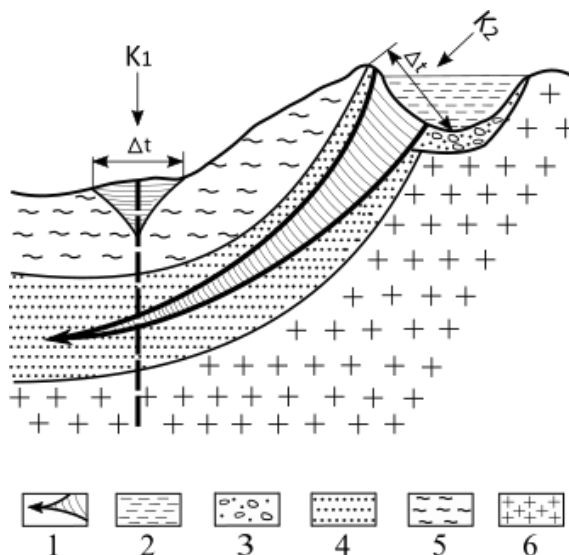


Рис. 5. Загальна схема формування інверсійного типу гідрогеотермічного режиму:

1 – напрямок руху поверхньої температурної хвилі; 2 – поверхнєве водоймище; 3 – водоносний шар у гравійно-галечникових відкладах; 4 – теж у пісках; 5 – глини, відносно водотривкі; 6 – кристалічні слабопроникні породи. K_1 та K_2 – коефіцієнти загасання температурної хвилі відповідно в умовах молекулярного та молекулярно-конвективного теплообміну

Інверсійно-відкритий тип гідрогеотермічного режиму визначається на підставі повного річного циклу спостережень та при точності вимірювань температуру $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Цей тип режиму у природі є найпоширенішим. Так як артезіанські басейни представляють собою переважно поверхове чергування водоносних горизонтів і водотривких товщ порід з наявністю зв'язку у водоносних горизонтів з поверхнею Землі в областях живлення, поверхнєві фактори впливають практично на всю осадову товщу. Аналітично оцінити масштаби цього впливу важко через складність обліку геолого-гідрогеологічної та теплофізичної неоднорідності таких систем. З якимсь ступенем наближеності це є можливим при використанні коефіцієнтів загасання температурних хвиль у тому випадку, якщо вони визначені експериментальним шляхом.

Необхідно мати на увазі, що у зв'язку з неоднорідністю водоносних горизонтів наведені дані відображають лише схематично масштаби впливу поверхневих факторів в ідеалізованих гідрогеологічних умовах. Час, за який артезіанський басейн загалом піддається впливу клімату, залежить також від відстані між областями живлення та розвантаження, потужності перекриваючої водостійкої товщі порід, глибини залягання фундаменту, потужності водоносних горизонтів, ступеня розкритості басейну (вихід водоносних пластів на поверхню в області живлення та розвантаження, наявності «гідрогеологічних вікон», переливів між водоносними горизонтами тощо).

У зв'язку з чим, при проектуванні гідротермальних теплонасосних систем необхідно враховувати гідрогеологічні особливості району їх розміщення та типи гідрогеотермічного режиму. Це пов'язано з тим, що на ефективність тепло насосної системи впливають два показника, це температура на виході з конденсатора та температура на вході до випарника.

$$\varphi = Q_1/N = (Q_2 + N)/N = T_2/(T_2 - T_{11}), \quad (4)$$

де

Q_1 – теплопродуктивність ТНУ, Вт;

N – потужність компресора, Вт;

T_2 – температура теплоносія на виході з конденсатора, К;

T_{11} – температура теплоносія на вході у випарник.

З урахуванням того, що температура на виході з конденсатора обумовлюється системою теплозабезпечення будівлі і температурним режимом опалення та є контрольованою, а температура на вході в випарник залежить від природних факторів що відбуваються в земній поверхні та умов навколишнього середовища то температура на вході в випарник залежить від природних факторів що відбуваються в земній поверхні та умов навколишнього середовища що не завжди є постійними та стабільними.

Розрахунок та результати залежності енергетичної ефективності експериментальної теплонасосної установки від падіння температури природного теплоносія, а відповідно і на вході до випарника теплонасосної системи наведені в роботі [13].

Висновки

1. Доведено, що найбільш ефективними є теплонасосні системи які використовують теплоту ґрунту або ґрунтових вод та мають теплообмінники та свердловини встановлені на глибину нижче нейтрального шару.

2. Теоретично та експериментально підтверджено, що ендегенні та екзогенні фактори, впливають на глибину залягання нейтрального шару. Визначено, що екзогенні фактори в порівнянні з ендегенними мають більший вплив на формування термічного режиму гідросфери.

3. Підтверджено, що в залежності від гідрогеологічних умов, зони розташування свердловин геотермальної теплонасосної системи, нижче теоретично визначеної глибини нейтрального шару можуть повторно утворюватися зони з девіацією температури ґрунту.

4. Підтверджено, що під час проектування геотермальних теплонасосних систем необхідно враховувати, що на ділянках, де перепади висот рельєфу є близькими за розміром з глибиною залягання продуктивного водоносного горизонту коефіцієнт трансформації теплонасосної системи може суттєво відрізнятись від розрахункового.

5. Підтверджено, що для ефективного використання водоносного горизонту як природного акумулятора теплової енергії необхідно проведення попередніх гідрогеологічних досліджень та якісне вивчення як існуючого антропогенного навантаження так і геоморфологічних, геологічних та гідрогеологічних параметрів ділянки проведення бурових робіт.

Список використаної літератури

1. Suveizdis P., Rasteniene V., Zinevicius F. (2000) Geothermal potential of lithuania and outlook for its utilization. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*. Kyushu : Tohoku : Japan, May 28 – June 10. 2000. pp. 1356-1367.
2. Zhu K, Blum P., Ferguson G., Balke K., Bayer P. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res.* no. 5, pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
3. Oliinyk H. (2022) Study of the efficiency of using a heat pump in the heat supply system of a private house. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, vol. 107, no 3, pp. 14-20. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.03
4. Олійниченко В.Г., Марченко М.В., Кушнір І.О. (2017) Ефективні напрямки інвестування в галузі геотермальної енергетики. *Відновлювана енергетика*, № 3, С. 73-79.
5. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Ніколаєвська Н.В., Добровольський М.П. (2019) Оцінка ефективності використання теплового потенціалу довкілля та верхніх шарів Землі України. *Відновлювана енергетика*, № 4(63), С. 80-88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
6. А. А. Барило. (2020) Аналіз гідрогеологічних і геотермічних характеристик геотермальних об'єктів України. *Відновлювана енергетика*, № 1(60), С. 74–84. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).74-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).74-85)
7. Малкін Е.С., Кулінко Є.О. (2014) Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплозапобігання*, № 17, С. 63–69.
8. Zurian O.V., Barilo A.A. (2022) Impact of the natural temperature regime of the upper layers of earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, vol 31, no 3, pp. 575-584. <https://doi.org/10.15421/112254>
9. Зур'ян О.В. (2023) Вплив потоку підземних вод на геотермальний градієнт. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 2(139), С. 153-161. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.2.1910>
10. Зур'ян О.В. (2021) Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної системи. *Відновлювана енергетика*, № 1 (56), С. 10-19. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
11. Фролов Н.М. (1991) *Основи гідрогеотермії*. Під редакцією В.І. Лялько. М: Надра. 1991. 335 с.
12. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Олійниченко В.Г., Величко В.В. (2019) Експериментальне дослідження добового акумулювання холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва. *Відновлювана енергетика*, № 3, С. 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77)
13. Зур'ян О.В. (2023) Врахування динаміки змін температури підземних вод на ділянках берегових водозаборів гідротермальних теплонасосних систем. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, № 2 (85), С. 20-28.

References

1. Suveizdis P., Rasteniene V., Zinevicius F. (2000) Geothermal potential of lithuania and outlook for its utilization. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu : Tohoku : Japan, May 28 – June 10. 2000. pp. 1356-1367.
2. Zhu K, Blum P., Ferguson G., Balke K., Bayer P. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res.* no. 5, pp. 1-6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>
3. Oliinyk H. (2022) Study of the efficiency of using a heat pump in the heat supply system of a private house. Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, vol. 107, no 3, pp. 14-20. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.03
4. Oliinychenko V.G., Marchenko M.V., Kushnir I.O. (2017) Efektyvni napriamky investuvannia v haluzi heotermalnoi enerhetyky [Effective investment directions in the field of geothermal energy]. *Renewable energy*, no. 3, pp. 73-79.
5. Morozov Yu.P., Chalaev D.M., Nikolaevska N.V., Dobrovolskyi M.P. (2019) Otsinka efektyvnosti vykorystannia teplovoho potentsialu dovkillia ta verkhnikh shariv Zemli Ukrainy. [Estimation of the efficiency of using the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth of Ukraine]. *Renewable Energy*, vol. 63, no 4, p. 80-88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)
6. Barilo A. A. Analiz hidroheolohichnykh i heotermichnykh kharakterystyk heotermalnykh ob'ektiv Ukrainy [Analysis of hydrogeological and geothermal characteristics of geothermal objects in Ukraine]. *Renewable energy*. vol. 160, no. 1, pp. 74–84. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).74-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).74-85)
7. Malkin E.S., Kulinko E.O. (2014) Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut prypoverkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora. [Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use near-surface layers of water as a heat accumulator]. *Ventilation, Illumination and Heat-Gas Supply*, no. 17, pp. 63–69.
8. Zurian O.V., Barilo A.A. (2022) Impact of the natural temperature regime of the upper layers of earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, vol. 31, no 3, pp. 575-584. <https://doi.org/10.15421/112254>
9. Zurian O.V. (2023) Vplyv potoku pidzemnykh vod na heotermalnyi hradient.[The influence of groundwater flow on the geothermal gradient]. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, vol. 139, no. 2, pp. 153-161. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.2.19>
10. Zurian O.V. (2021) Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy. [Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system]. *Renewable energy*, vol. 56, no. 1, pp. 10-19. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89)
11. Frolov N.M. (1991) Osnovy hidroheotermii. [Basics of hydrogeotermii]. M: Nadra, 991. 335 p.
12. Morozov Yu.P., Chalaev D.M., Olynichenko V.G., Velichko V.V. (2019) Eksperymentalne doslidzhennia dobovoho akumuluvannia kholodu shliakhom vykorystannia vody pidzemnykh horizontiv m. Kyieva. [Experimental study of daily accumulation of cold by using water from the underground horizons of the city of Kyiv]. *Renewable energy*, no. 3, pp. 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77)
13. Zurian O.V. Vrakhuvannia dynamiky zmin temperatury pidzemnykh vod na diliankakh berehovykh vodozaboriv hidrotermalnykh teplonasosnykh system. [Taking into account the dynamics of changes in the temperature of underground water in the areas of coastal water intakes of hydrothermal heat pump systems]. *Bulletin of the Kherson National Technical Universit*, vol. 85, no. 2, pp. 20-28.