

© Д.В. Рудаков¹, О.В. Інкін¹, Н.І. Дерев'ягіна¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

АНАЛІЗ ТИПІВ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕСУРСУ ЗАКРИТИХ ШАХТ

© D. Rudakov¹, O. Inkin¹, N. Dereviachina¹¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF TYPES OF GEOTHERMAL SYSTEMS FOR USING HEAT RESOURCE OF CLOSED MINES

Мета. Виконання комплексного аналізу експлуатації геотермальних систем різних типів, які використовуються для освоєння теплового ресурсу непрацюючих шахт з визначенням їх переваг та недоліків, а також обґрунтування рекомендацій щодо пріоритетних місць та умов розташування окремих типів систем на Донбасі.

Методика. Геолого-гідрогеологічний та геотехнічний аналіз можливості використання геотермальних систем різних типів в гірничо-геологічних умовах закритих шахт Донецького вугільного басейну з урахуванням конструктивних особливостей систем і досвіду їх промислового і експериментального застосування в різних країнах.

Результати. Встановлено, що геотермальні безповоротні системи зі скидом термічно відпрацьованих вод у поверхневі водотоки можуть бути рекомендовані на шахтах з незначною мінералізацією вод та водовідливом, який забезпечує гідродинамічну безпеку прилеглих територій. Скид вод в ставки-відстійники енергетично доцільний лише в літній період при розташуванні ставків поблизу місць відбору води. Системи зі зворотним скидом води у шахту застосовні у разі неможливості скидання вод у водотоки через екологічні обмеження. Скид термічно використаних вод до ствола, з якого вони відбираються, є прийнятним лише на шахтах з незначним відбором, потужною зоною затоплення і великими значеннями геотермічного градієнта. Геотермальні U-подібні та коаксіальні зонди в умовах непрацюючих шахт можуть бути встановлені у верхній частині закладеного ствола з відбором тепла від гірських порід і у затоплених гірничих виробках з відбором тепла від шахтних вод.

Наукова новизна. Уперше для закритих вугільних шахт Донецького басейна визначені умови оптимального застосування на їх базі безповоротних та циркуляційних геотермальних систем відкритого типу, що враховують мінералізацію шахтних вод, потужність зони затоплення, конструкцію системи водовідливу, гірничотехнічні, геотермальні та гідродинамічні особливості.

Практична значимість. Отримані рекомендації щодо ефективності роботи різних геотермальних систем в гірничо-геологічних та геотехнічних умовах непрацюючих шахт Донбасу будуть використані для визначення пріоритетних місць їх розташування.

Ключові слова: закриті шахти, геотермальні системи, аналіз роботи, ефективність, пріоритет, розташування.

Вступ. Згідно вимог різних світових і вітчизняних нормативних документів [1, 2] в Україні відбувається поступове скорочення вугільної індустрії. Це стосується, насамперед, закриття державних шахт, що передбачено концепцією реформування даної галузі [3, 4], яка була представлена в Комітеті Верховної Ради з питань енергетики та житлово-комунальних послуг у січні 2020 г. На даний момент з 148 вугільних шахт України 46 знаходяться в приватній і 102 у

державній власності. При цьому велика частина (67) державних шахт розташовані на непідконтрольній Україні території, а з решти 35 шахт, 2 – не працюють, 4 – прибуткові, інші 29 вважаються збитковими і найближчим часом будуть закриті. Разом з тим, закриття шахт – це досить витратний і капіталомісткий процес, пов'язаний з необхідністю підтримання безпечних гідродинамічних рівнів шахтних вод для запобігання підтопленню територій, забруднення використовуваних для водопостачання верхніх водоносних горизонтів і затопленню сусідніх працюючих шахт. Крім того, ліквідація шахт призведе до дефіциту теплової енергії у вугледобувних регіонах, що обумовлює необхідність пошуку її альтернативних джерел і можливості використання теплового ресурсу шахти після її закриття.

Аналіз науково-практичного досвіду показує [5, 6], що на даний момент в деяких країнах світу (Німеччина, Великобританія, Сполучені Штати, Іспанія та інші) для вирішення цих проблем на закритих шахтах встановлено та експлуатуються геотермальні системи відкритого (теплоносій – шахтні води) та закритого типу (теплоносій – спеціальна рідина, що гідравлічно ізольована від шахтних вод, між ними відбувається теплообмін). Хоча переважна більшість цих систем має відносно невелику теплову потужність (до 1 МВт), цього достатньо для опалення однієї чи кількох будівель, розташованих неподалік від колишньої шахти, при цьому підтримується безпечний рівень підземних вод на прилеглих до шахт територіях. Отже, світовий досвід використання тепла шахт для опалення будівель демонструє технічні можливості реалізації, рентабельність та екологічну привабливість цієї геотехнології, що в умовах зростання цін на викопне паливо свідчить про необхідність практичного впровадження геотермальних систем на закритих шахтах в Україні.

Постановка завдання. Для оцінки можливості використання геотермальних систем різних типів в гірничо-геологічних та геотехнічних умовах закритих шахт Донецького вугільного басейну необхідно виконати комплексний аналіз результатів промислового й експериментального застосування цих систем на окремих об'єктах в різних країнах світу, враховуючи їх конструктивні переваги і недоліки, що обумовлюють різні сфери оптимального застосування даних геотермальних технологій. На основі результатів проведеного аналізу передбачається розробити рекомендації щодо можливості і доцільності експлуатації геотермальних систем на закритих шахтах з урахуванням їх природних і техногенних умов. У зв'язку з цим, **метою даної роботи** є проведення комплексного аналізу експлуатації геотермальних систем різних типів, які використовуються для освоєння теплового ресурсу непрацюючих шахт з визначенням їх переваг та недоліків, а також обґрунтування рекомендацій щодо пріоритетних місць та умов розташування окремих типів систем на Донбасі.

Основна частина. *Системи відкритого типу.* Геотермальні системи відкритого типу, засновані на безпосередньому відборі шахтних вод і використанні їх теплового ресурсу поділяються на кілька видів [7, 8] (рис. 1) відповідно до напрямку скиду термічно використаних шахтних вод:

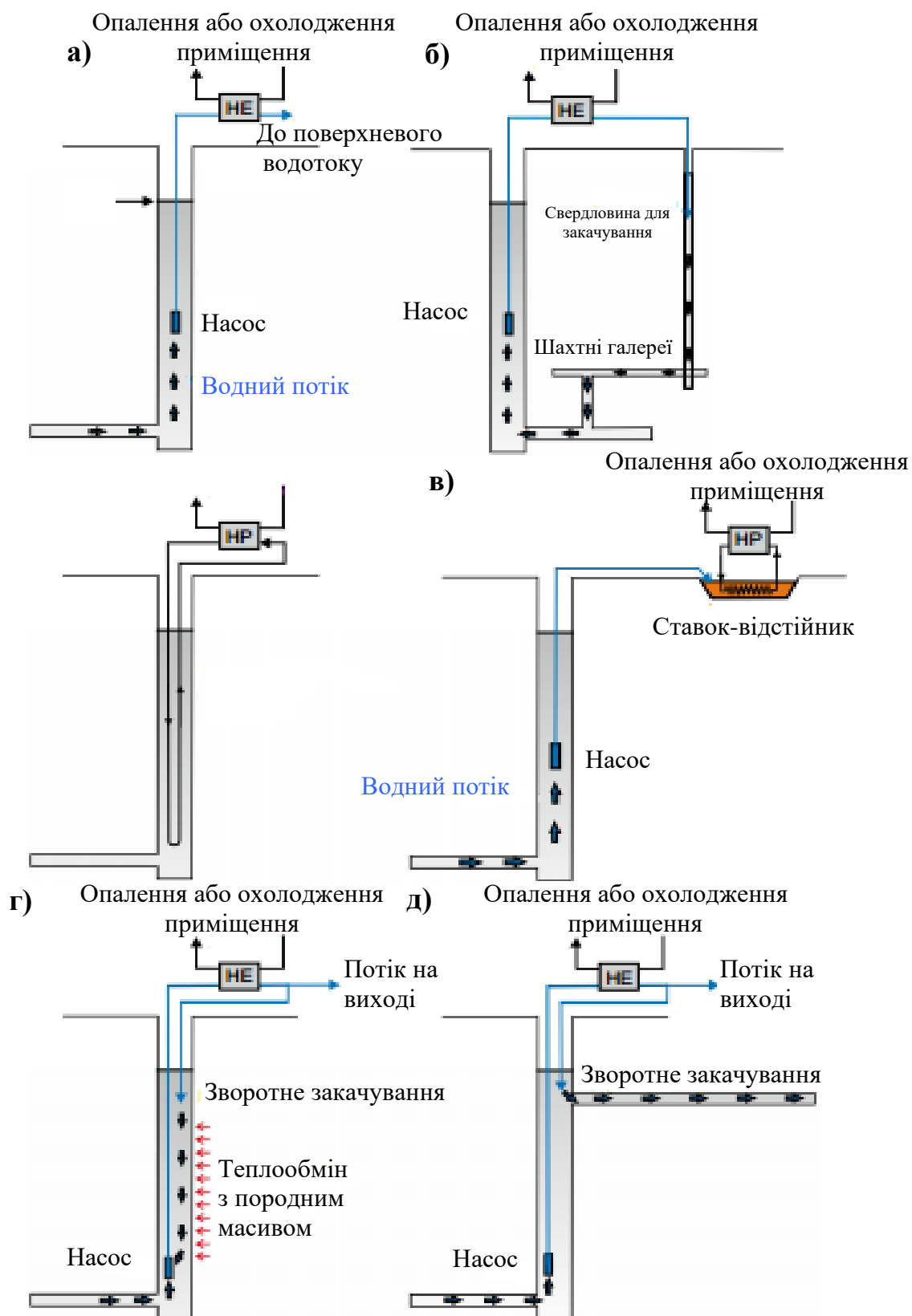


Рис. 1. Геотермальні системи відкритого типу: НЕ – проміжний теплообмінник; НП – тепловий насос; назви систем «а» – «д» див. текст

- а) у поверхневій водотоки;
- б) у ставки-відстійники;
- в) до шахти через свердловини, наприклад, колишні дегазаційні;
- г) до шахти через шахтний ствол;
- д) до шахти через горизонтальні гірничі виробки, які мають вихід на денну поверхню.

Найбільш поширеними з цих систем є системи зі скидом відпрацьованих вод в поверхневій водотоки (а), де вода відбирається з затопленої шахти через основний ствол і подається далі до проміжного теплообміннику на денній поверхні, який поєднаний з тепловим насосом [9]. Після теплообміну шахтна вода скидається у поверхневій водотоки чи водойми. Прикладом такої схеми є ствол шахти Барредо в Мьєрес (Іспанія) [5], де прийнятна якість води дозволяє відмовитися від її додаткового очищення, та шахта Кепхаус (Великобританія) [10], де теплообмін відбувається до очищення шахтної води. Загальними недоліками систем відкритого типу є зростання витрат на обробку і очищення робочих поверхонь від забруднення твердим осадом внаслідок хімічних реакцій [11]. Істотною перевагою цього варіанту системи відкритого типу є обов'язковий відбір шахтних вод для підтримки їх безпечного рівня в межах шахтного поля і прилеглих територій. У деяких випадках відбір шахтних вод зі ствола однієї шахти забезпечує дренаж сусідніх шахт, які мають гідродинамічний зв'язок з дренажною шахтою.

Зважаючи на це, геотермальні системи зі скидом вод у поверхневій водотоки в умовах Донбасу можуть бути рекомендовані на шахтах з незначною мінералізацією вод (переважно неглибоких), що дозволить знизити витрати на їх очищення та вплив на навколишнє середовище, а також на шахтах, де працюючий водовідлив забезпечує гідродинамічну безпеку прилеглих територій і сусідніх шахт.

У системах зі скидом шахтних вод у ставки-відстійники (б) тепло з них відбирається за допомогою проміжного теплообміннику, встановленого безпосередньо в ставку, куди скидаються шахтні води. При цьому теплоносій, що циркулює по теплообміннику, відбирає теплову енергію з вод ставка і віддає її тепловому насосу, який використовується для опалення або гарячого водопостачання.

Перевагою даної системи є наявність великого ресурсу тепла, зосередженого у воді ставка, який може бути використаний в якості низькопотенційного джерела енергії в тепловому насосі. Недоліком цієї системи є суттєве охолодження шахтних вод при їх зберіганні у ставку за низької температури повітря, а також витрати енергії, пов'язані з транспортуванням води по денній поверхні до відстійника. Тому в умовах Донбасу такі системи енергетично доцільні лише в літній період на шахтах, де ставки-відстійники розташовані поблизу місць відбору шахтних вод.

Якщо скидання шахтних вод у поверхневій водотоки неможливе через екологічні обмеження, пов'язані з присутністю токсичних речовин у шахтній воді (важкі метали, солі, нафтопродукти, висока кислотність тощо), доцільно використовувати системи зі зворотним скидом термічно відпрацьованої води в розташовані

на шахтному полі свердловини після теплообміну (в). Перевага цих систем полягає в тому, що водні ресурси не виснажуються, підтримується водний та сольовий баланс, а витрати на очистку та утилізацію мінімізуються. З іншого боку, це вимагає буріння та обслуговування свердловин зворотного закачування і створює ризик виникнення теплового «зворотного зв'язку» між точками відбору і скиду води. Схеми цього типу встановлені поблизу міст Шеттлстон, Глазго, Лумфіннанс, Файф у Шотландії (Великобританія) [6] та Хеерлен у Голландії [7, 12].

В умовах Донбасу такі системи можуть бути рекомендовані на шахтах, де в межах їх поля наявні додаткові стволи або свердловини великого діаметра для скидання термічно відпрацьованих вод. Такі гірничі виробки повинні бути гідравлічно пов'язані з основним стволом для перетікання відпрацьованих вод до місця відбору і їх нагріву в процесі фільтрації.

У системах зі зворотним скидом шахтних вод до ствола, з якого відбувається їх відбір (г), термічно відпрацьована вода поглинає тепло з оточуючих порід, потім подається у насос і знову піднімається на денну поверхню для використання в теплообміннику. Перевагою цієї системи є значне скорочення витрат на транспортування термічно відпрацьованих вод по денній поверхні. Однак її застосування накладає обмеження на витрату води залежно від об'єму затоплення ствола і довжини шляху фільтрації вод до місця відбору у зв'язку з необхідністю їх нагрівання перед повторним використанням. В умовах Донбасу застосування даної системи може бути рекомендовано на шахтах з незначним відбором шахтних вод, потужною зоною затоплення і великими значеннями геотермічного градієнта.

У системах зі зворотним скидом шахтних вод в горизонтальні гірничі виробки (д), відпрацьовані води скидаються в шахтний ствол, де встановлено насос; проте на відміну від попереднього випадку вода рухається не вниз ствола до насоса, а надходить до розташованої вище горизонтальної виробки (галереї), яка має вихід на денну поверхню поблизу водотоку. У цьому випадку також суттєво знижуються витрати на транспортування термічно відпрацьованих вод по денній поверхні. Однак з урахуванням того, що рельєф Донбасу представлений височиною з рівними міжрічковими долинами, шахти з такими виробками мають обмежене поширення на даній території і більш характерні для місцевості зі значними перепадами абсолютних відміток.

У табл. 1 наведені дані щодо відкритих циркуляційних геотермальних систем, що наразі експлуатуються у різних країнах світу. Зазначимо, що тепловий потенціал шахтних водовідливів зі скидом у поверхневі водотоки (безповоротні системи) майже не використовується; це тип відкритих систем є перспективним, але обмежений через відсутність потужних місцевих споживачів теплової енергії.

Звичайно, всі розглянуті системи можуть бути встановлені на закритих шахтах Донбасу тільки після детального техніко-економічного обґрунтування, що включатиме зіставлення кількості вироблюваної ними теплової енергії та витрат електроенергії на роботу теплових насосів, підйом, закачування і рух шахтних вод. Крім того, у випадку систем відкритого типу без повернення відпрацьованої води в шахту, витрата відбору шахтних вод оцінюється з урахуванням гідрогео-

логічних умов шахтного поля за критерієм підтримання гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод нижче підошви приповерхневих водоносних горизонтів, які використовуються для питного водопостачання, що попереджує забруднення підземних вод. У разі зворотних систем, інтенсивність відбору шахтних вод може бути оптимізована відповідно до потреб споживачів в тепловій енергії, які знаходяться в безпосередній близькості від шахти.

Таблиця 1

Об'єкти з використання геотермальної енергії на закритих шахтах у світі [6 – 12]

Країна	Кількість систем	Температура шахтних вод, °С	Температура води для споживача, °С	Витрата води при відкачуванні, м ³ /год	Доступний обсяг шахтних вод, млн. м ³	Теплова потужність, кВт	Глибина теплообмінника, м
Німеччина	14	10,2-50	19,42-90	10,8-1427	1,75-495	47-1500	0-216
Великобританія	4	12-15	45-55	0,72-125	н/д	62-68	0
США	3	12-16	22-50	17-20,5	265	112,5	0
Болгарія	1	16-20	н/д	252	н/д	н/д	н/д
Канада	1	н/д	н/д	н/д	8	3,6-5,3	
Росія	1	18-23	95	100	н/д	40 000	0
Словенія	1	33-34	н/д	н/д	н/д	н/д	
Україна	1	12	45	66,7	н/д -	60	0

Системи закритого типу. Разом з геотермальними системами відкритого типу на закритих шахтах застосовуються системи на основі геотермальних зондів, в яких теплоносій циркулює гідравлічно ізольовано від шахтних вод та оточуючих порід, а теплообмін відбувається через стінки зондів – труб, що виготовляються переважно з поліетилену. Такі системи ідентифікують як системи закритого типу.

Геотермальні зонди можуть бути встановлені:

–у верхній частині закладеного шахтного ствола або у невикористовувані свердловини (наприклад, дегазаційні), тоді тепло відбирається від оточуючих гірських порід;

–в затоплених гірничих виробках, переважно у вертикальних, таких, як шахтний ствол, тоді тепло відбирається від шахтної води.

Відповідно до типу циркуляції та геометрії виділяють:

- а) одинарні U-подібні зонди,
- б) здвоєні U-подібні зонди,
- в) коаксіальні зонди.

Схеми цих зондів, представлені на рис. 2, були розглянуті в роботі [13].

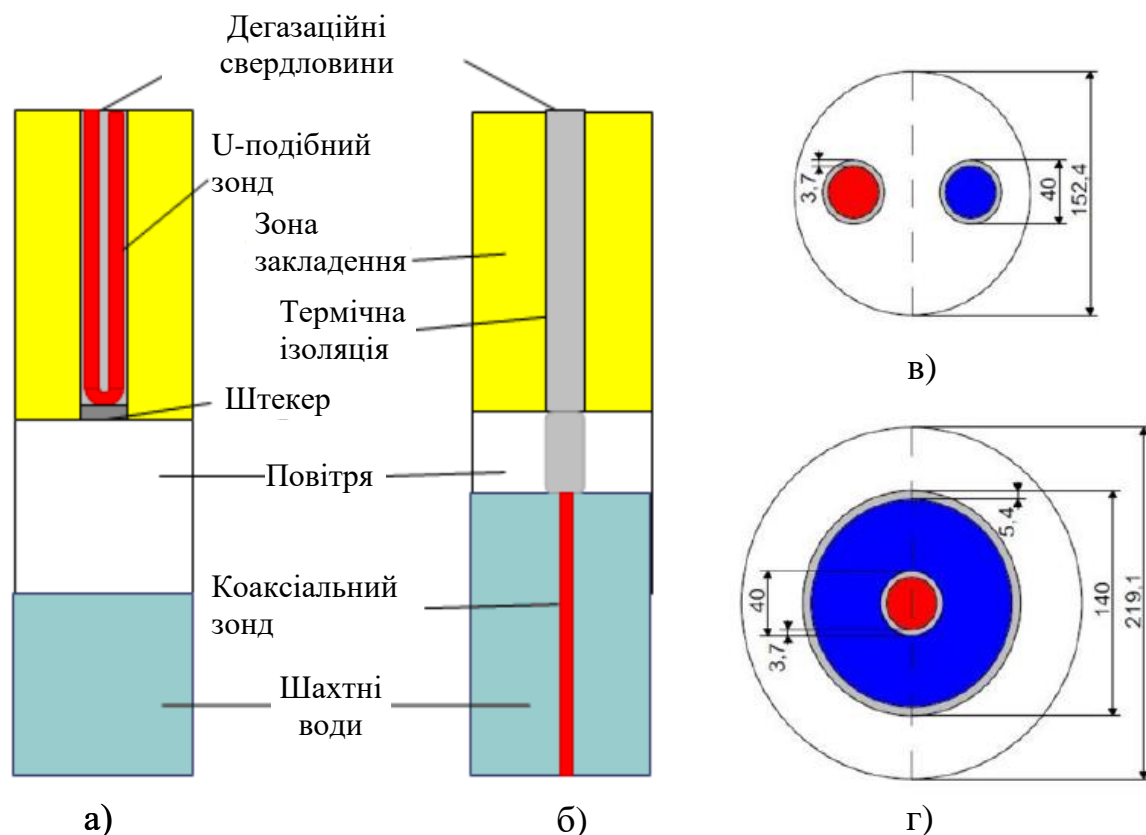


Рис. 2. Варіанти та поперечний перетин U-подібного (а, в) і коаксіального (б, в) геотермального зондів у вертикальних гірничих виробках. Червоним кольором позначені труби з теплим теплоносієм, синім – з холодним

Принципова схема геотермального модулю закритого типу включає розташовані в гірничих виробках шахти зонди, в яких циркулює теплоносієм (25-38% водний розчин етиленгліколю). На виході з теплового насосу, на денній поверхні, теплоносієм має температуру, яка нижче температури оточуючих зонд шахтних вод або порід. Теплова енергія з порушеного породного масиву, який повністю або частково затоплений, нагріває теплоносієм до певної температури. Нагрітий теплоносієм надходить у випарник теплового насоса, віддає тепло і знову нагнітається в зонд зі зниженою температурою. Отримана насосом теплова енергія подається споживачу через опалювальний контур і систему гарячого водопостачання. Для покриття піків споживання теплової енергії будівлями в холодну пору року має використовуватися резервна котельня, яка працює на викопному паливі (вугілля, газ).

У разі помірної температури шахтної води в діапазоні 17 – 20 °С, теплові насоси можуть бути використані не тільки для підігріву в опалювальний сезон, але й для охолодження повітря в літній період, аналогічно тому, як це зроблено на шахті Барредо в Іспанії [5]. Це особливо актуально для кліматичних умов Захід-

ного та Центрального Донбасу з теплим посушливим літом та поступового зростання літніх температур в останні десятиліття внаслідок кліматичних змін.

З точки зору конструкції одинарний U-подібний зонд являє собою поєднані внизу дві паралельні поліетиленові труби (як правило PE100 SDR11), основні характеристики яких наведені в табл. 2. Здвоєний U-подібний зонд складається з двох близько розташованих (в одній свердловині), та міцно зафіксованих одинарних зондів, по яким паралельно, але незалежно, циркулює теплоносій.

Таблиця 2

Параметри поліетиленових труб, які використовують в U-подібних геотермальних зондах [15]

Специфікація труб	20×2,0	25×2,3	32×3,0	40×3,7	50×4,6	63×5,8
Зовнішній діаметр, м	0,02	0,025	0,032	0,04	0,05	0,063
Товщина стінки, м	0,002	0,0023	0,003	0,0037	0,0046	0,0058
Внутрішній діаметр, м	0,016	0,0204	0,026	0,0326	0,0408	0,0514
Обсяг на м труби, дм ³	0,201	0,327	0,531	0,835	1,308	2,070
Діапазон витрати, дм ³ /год	100 – 1080	100 – 1100	300 – 3000	1500 – 18600	1500 – 18600	1500 – 18600

Коаксіальний зонд складається з двох труб, розташованих одна в другій. Через внутрішню пластикову теплоізолювану трубу подається теплоносій на дно зонда, який потім піднімається по міжтрубному зазору, відбираючи тепло з шахтних вод чи оточуючих порід через сталеву стінку зовнішньої труби, яка має високу теплопровідність. Діаметр внутрішньої труби коаксіального зонда, як правило, знаходиться в діапазоні 0,3 – 0,4 м, а зовнішньої – 0,14 – 0,16 м [14].

При встановленні геотермальних зондів витрати електроенергії на підйом води відсутні; електроенергія витрачається на прокачування теплоносія та забезпечення роботи теплового насосу на поверхні землі. Основним критерієм доцільності встановлення та експлуатації геотермального модулю є позитивний енергетичний баланс, який визначається як різниця між отриманою тепловою енергією, відібраною тепловим насосом з шахтних вод та тепловим еквівалентом електричної енергії, витраченої на прокачку теплоносія та роботу теплового насосу [13]. На відміну від геотермальних систем відкритого типу, системи закритого типу не потребують відбору шахтної води, не змінюють її сольовий баланс, тим самим попереджуючи засолення верхніх водоносних горизонтів, що є суттєвою перевагою в умовах жорстких екологічних обмежень. Експлуатація систем закритого типу може бути економічно вигідною за наявності навіть невеликих індивідуальних споживачів теплової енергії.

Системи закритого типу є менш потужними ніж відкритого, але зонди можуть встановлюватися практично у всі гірничі виробки і свердловини в межах шахти, збільшуючи цим сумарну теплову потужність. Крім того, системи закритого типу характеризуються набагато меншою вартістю, ніж відкритого і можуть

бути використані для опалення локальних малопотужних об'єктів (адміністративні та складські приміщення, тепличні господарства, окремі будівлі), які зазвичай розташовані поруч із шахтою. Разом з тим, незважаючи на зазначені переваги геотермальних систем закритого типу, у світі відомі тільки окремі приклади їх експериментальної експлуатації на непрацюючих шахтах [16-19], які, однак, ще не стали поширеними навіть за кордоном.

Аналіз експлуатації геотермальних зондів [20-22] показує, що коаксіальні зонди переважно характеризуються більшою тепловою потужністю, проте їх встановлення на території закритих шахт Донбасу обмежена внаслідок більшого діаметру. Так, розташовані в межах шахт геологорозвідувальні і дегазаційні свердловини, як правило, мають діаметр до 0,13 м і не підходять для розміщення цих зондів. Крім того, коаксіальні зонди вимагають більшої потужності насосу для подолання гідродинамічного опору при русі теплоносія у внутрішній трубі і міжтрубному зазорі, а також характеризуються більшою вартістю порівняно з U-подібними зондами. Тому встановлення та експлуатація коаксіальних зондів доцільна тільки в шахтних стволах, які мають значний діаметр і тепловий ресурс шахтних вод.

З іншого боку, одинарні U-подібні зонди, хоча й характеризуються меншою тепловою потужністю, внаслідок меншого діаметра можуть бути розміщені майже у всіх виробках, наявних на шахтному полі, створюючи сумарно досить потужний тепловий потік. Крім того, за наявності на шахтному полі виробок підвищеного діаметра ($> 0,17$ м) їх теплопродуктивність може бути збільшена шляхом встановлення зведеного U-подібного зонда, потужність якого порівняна з потужністю коаксіального зонду [23, 24].

Прикладом застосування геотермальних зондів на закритих шахтах може служити промислове випробування цієї технології в селищі Альсдорф, що знаходиться в районі видобутку кам'яного вугілля поблизу м. Ахен (Німеччина) [25]. Використовувався зведений U-подібний зонд довжиною 860 м, занурений у воду у шахтному стволі від рівня 168 м нижче поверхні землі. В період з листопада 2018 р. по лютий 2019 р. тут було вироблено 168 МВт·год теплової енергії з середньою потужністю 64 кВт, економія викопного палива за опалювальний сезон становила 30%.

Ще одні прикладом роботи закритих геотермальних модулів на непрацюючих шахтах є тепла система, встановлена у м. Бьютт (штат Монтана, США), яка частково використовує тепло шахтних вод для опалення науково-дослідного комплексу загальною площею 5203 м² [26]. Геотермальні зонди системи встановлені у два гідродинамічно пов'язані шахтні стволи, які розташовані на відстані 275 м від комплексу. Рівень шахтних вод в стволах знаходиться приблизно на 35 м нижче денної поверхні, температура вод становить 25 °С, загальна довжина зонда – 183 м. Геотермальний модуль експлуатується разом з існуючою системою опалення в комплексі з двома тепловими насосами потужністю 87,5 кВт, які можуть працювати в режимі опалення або охолодження залежно від температури зовнішнього повітря.

Висновки. Проведений аналіз роботи геотермальних систем різних типів в світі показує, що доцільність та пріоритет їх встановлення на закритих шахтах визначається сукупністю різних факторів, найважливішими серед яких є: мінералізація вод; розташування ставків-відстійників; рельєф місцевості; наявність та стан гірничих виробок; величина водовідбору; геотермічний градієнт. Так, безповоротні системи відкритого типу з скидом термічно відпрацьованих вод у поверхневі водотоки, можуть бути рекомендовані на шахтах з незначною мінералізацією вод, що дозволить знизити витрати на їх очищення, а також на шахтах, де водовідлив забезпечує гідродинамічну безпеку прилеглих територій. Системи з скидом вод в ставки-відстійники енергетично доцільні лише в літній період та на шахтах де ставки розташовані поблизу місць відбору вод.

Системи зі зворотним скидом відпрацьованої води у шахту повинні застосовуватися коли скидання вод у водотоки неможливе через екологічні обмеження та на шахтах де в межах їх поля є додаткові стволи або свердловини великого діаметра. Системи з скидом вод до ствола, з якого відбувається їх відбір можуть бути рекомендовані на шахтах з незначним відбором, потужною зоною затоплення і великими значеннями геотермічного градієнта. Системи з зворотним скидом вод в горизонтальні гірничі виробки (галереї) характерні для шахт де ці виробки мають широке поширення, наприклад для місцевості з значними перепадами абсолютних відміток.

Системи закритого типу на основі геотермальних зондів в умовах непрацюючих шахт можуть бути встановлені у верхній частині закладеного ствола з відбором тепла від гірських порід і у затоплених гірничих виробках з відбором тепла від шахтних вод. Незважаючи на меншу теплову потужність U-подібних зондів, внаслідок незначного діаметра труб (0,02 – 0,063 м) вони можуть бути розміщені майже у всіх наявних на шахтному полі вертикальних виробках. Встановлення коаксіальних зондів з більшою тепловою потужністю обмежено їх більшим діаметром (0,14 – 0,16 м).

Подальший розвиток досліджень у цьому напрямку доцільно проводити шляхом детального технологічного, екологічного та техніко-економічного обґрунтування встановлення різних геотермальних систем на конкретних закритих шахтах Донбасу.

Дослідження виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2020.01/0528) у рамках програми «Наука для безпеки людини та суспільства».

Перелік посилань

1. Sribna, Y., Trokhymets, O., Nosatov, I., & Kriukova, I. (2019). The globalization of the world coal market – contradictions and trends. *E3S Web of Conferences* 123(4):01044, 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301044>.
2. *Coal Atlas – Facts and figures on a fossil fuel.* (2015). Heinrich Böll Foundation, Berlin, Germany, and Friends of the Earth International, London, UK.
3. Polunina, O., & Balan, S. (2021). *Vuhilna reforma: kontseptsiiia zminylasia.* <https://ua.boell.org/uk/2021/01/26/vuhilna-reforma-koncepciya-zminilasya>

4. Golubeva, Ye. (2020). Situatsiya v ugol'noy otrasli Ukrainy. <https://112.ua/statji/orzhel-posoveto-val-detyam-shahterov-ne-idti-po-stopam-roditeley-pochemu-vlast-reshila-likvidirovat-shahty-522909.html>
5. Loredó, C., Roqueñí, N., & Ordóñez A. (2016). Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use: A review. *Int J of Coal Geology*, 164, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
6. Gillespie, M. R., Cran, E. J., & Barron, H. F. (2013). Deep geothermal energy potential in Scotland British Geological Survey Geology and Landscape. *Scotland Programme. Commissioned Report Cr, 12*(131).
7. Banks, D., Athresh, A., Al-Habaibeh, A., & Burnside, N. (2019). Water from abandoned mines as a heat source: practical experiences of open- and closed-loop strategies, United Kingdom. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 29–50.
8. Ramos, E., Breede, K., & Falcone, G. (2015). Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. *Environ Earth Sci*, 73, 6783–6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>.
9. Sadovenko, I., Rudakov, D., & Inkin, O. (2014). Geotechnical schemes to the multi-purpose use of geothermal energy and resources of abandoned mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 443–450.
10. Burnside, N. M., Banks, D., & Boyce, A. J. (2016). Sustainability of thermal energy production at the flooded mine workings of the former Caphouse Colliery, Yorkshire, United Kingdom. *Int J Coal Geol*, 164, 85–91.
11. Ni, L., Dong, J., Yao, Y., Shen, C., Qv, D., & Zhang, X. (2015). A review of heat pump systems for heating and cooling of buildings in China in the last decade. *Renewable Energy*, 30–45. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.043>.
12. LANUV, N. (2018). Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz nordrhein-westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser–Fachbericht 90. *Recklinghausen, Germany*.
13. Rudakov, D., & Inkin, O. (2021). Validation of the operation efficiency criteria for geothermal probes in flooded mine workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 100–105. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/100>
14. Zhanga, H., Baeyensb, J., Cáceresc, G., & Degrèvea, J. (2016). Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, 53, 1-40. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2015.10.003>
15. *Viessman Planungshandbuch. Wärmepumpen*. (2011). Viessman GmbH.
16. Karu, V., Robam, K., & Valgma, I. (2012). Potential usage of underground minewater in heat pumps. *Estonian Geographical Society*, 1–20.
17. *Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW*. (2015). Technischer Bericht 40. LANUV NRW. Recklinghausen.
18. Bremerich-Ranft, B. (2020). *Das Erdwärmesonden-Testfeld am Energiezentrum Willich – Vorstellung und bisherige Erkenntnisse. Präsentation an 16. NRW Geothermiekonferenz*.
19. *Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. (DGG)*. (2015). Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT).
20. *Final Technical Report. A Demonstration System for Capturing Geothermal Energy from Mine Waters beneath Butte, Montana*. DOE Award Number: 10EE0002821.
21. Bockelmann, F., & Fisch, M. N. (2019). It Works Long-Term Performance Measurement and Optimization of Six Ground Source Heat Pump Systems in Germany. *Energies*, 12. <https://doi.org/10.3390/en12244691>.
22. Liu, H., Zhang, Y., & Javed, S. (2020). Long-Term Performance Measurement and Analysis of a Small-Scale Ground Source Heat Pump System. *Energies*, 13. <https://doi.org/10.3390/en13174527>.

23. Xiaobing, L., & Jeffrey, M. (2013). Field Test and Evaluation of Residential Ground Source Heat Pump Systems Using Emerging Ground Coupling Technologies. Oak Ridge National Laboratory, TM-2013/39. *Final Report. UT-BATTELLE, LLC for the U.S. Dept of Energy under contract DE-AC05-00OR22725.*
24. Casasso, A., & Sethi, R. (2019). Assessment and Minimization of Potential Environmental Impacts of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems. *Water, 11*.
<https://doi:10.3390/w11081573>.
25. Extraction of geothermal energy from a mine shaft located in the hard coal mining district of Aachen, Germany. Sustainable Heating. April 9, 2019 in Brussels. Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH, Energeticon,D.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/8.5_schetelig_sustainable_heating.pdf.
26. Liu, X., Malhotra, M., Walburger, A., & Skinner, J. (2016). Performance analysis of a ground-source heat pump system using mine water as heat sink and source. *ASHRAE Transactions, 122*(2).

ABSTRACT

Purpose. Comprehensive analysis of operating geothermal systems of different types installed for heat resource utilization in closed mines with determining their advantages and disadvantages, as well as providing recommendations on priority locations and operating conditions of certain types of these systems in Donbas.

Methods. Geological, hydrogeological, and geotechnical analysis of a possibility to use geothermal systems of different types under mining and geological conditions of closed mines in the Donetsk coal basin considering design features of the systems and the experience of their industrial and experimental applications in different countries.

Findings. It is established that geothermal non-backflow systems with discharge of thermally used water into surface watercourses can be recommended for mines with low total dissolved solids (TDS) in water and a drainage that provides hydrodynamic safety of adjacent areas. Discharge of water into settling ponds is reasonable in terms of energy balance only in the summer if these ponds are located near water withdrawal. Backflow systems are applicable if water discharge into watercourses is not permitted due to environmental constraints. Discharge of thermally used water back into to the shaft from which it is withdrawn can be acceptable only in mines with low drainage rates, a powerful flood zone and high values of the geothermal gradient. Geothermal U-shaped and coaxial probes in closed mines can be installed in the upper part of the backfilled shaft with heat withdrawal from rocks and from mine water in flooded mine workings.

Originality. A comprehensive analysis of conditions and indicators of geothermal systems in different countries allowed developing recommendations on a possibility and expediency of their operation in closed mines of Donbas considering their natural and technogenic conditions.

Practical significance. Obtained recommendations on the efficiency of various geothermal systems in mining, geological, and geotechnical conditions in closed mines of Donbas will be used for identifying their priority locations.

Keywords: *closed mines, geothermal systems, operation analysis, efficiency, priority, location.*