

УДК 622.228+[662.97:621.571.22] <https://doi.org/10.37101/ftpgp23.01.009>

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА КРИТЕРІЇВ ВСТАНОВЛЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ МОДУЛІВ НА ЗАКРИТИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

О.В. Інкін^{1*}, Д.В. Рудаков²

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

*Відповідальний автор: e-mail: inkin@ua.fm

AN ANALYSIS OF GEOTHERMAL SYSTEM INSTALLATION METHODS AND CRITERIA AT CLOSED COAL MINES

O.V. Inkin^{1*}, D.V. Rudakov²

¹Dnipro University of Technology, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

*Corresponding author: e-mail: inkin@ua.fm

ABSTRACT

Purpose of this work is to substantiate effective and hydrodynamically safe technological methods of geothermal heat recovery at closed coal mines by installation of geothermal modules of various designs.

Methodology is based on analytical equations to evaluate mine water drainage with maintaining the hydrodynamically safe water level within mining areas. Besides, we employ the equations for express calculations of water and rock heat recovery in business plans of geothermal system operation.

Results. The methods, criteria and sequence of installation of geothermal systems at closed mines of Donbas are analyzed according to the priority and feasibility, which will allow efficient mine water and rock heat recovery. The thermal needs of local consumers can be considerably covered by the geothermal systems.

Scientific novelty. The proposed method of calculating the basic parameters and indicators of geothermal modules allows performing a realistic assessment of the economic efficiency under conditions of closed mines in Donbas. We demonstrated quantitatively the influence of mine water discharge, water and rock temperature on economic indicators of geothermal systems.

Practical significance. The substantiated methods and criteria of ecologically safe and feasible recovery of geothermal potential of closed coal mines can provide heat production adjusted to the local consumer needs.

Keywords: closed mine; water hoisting; geothermal system; mine water; thermal energy

1. ВСТУП

Сучасна світова економічна та енергетична криза, залежність багатьох країн від імпорту первинних паливно-енергетичних ресурсів гостро ставить питання про їх економічне і раціональне використання. Світові тенденції розвитку енергетики свідчать про зменшення видобутку і споживання вугілля на тлі зростання частки альтернативних джерел енергії в енергозабезпеченні. Одним з пріоритетних напрямів розвитку «зелених» технологій є геотермальна енергетика, яка відповідає глобальним таким цілям сталого розвитку ООН, як боротьба зі зміною клімату, інновація і інфраструктура, чиста енергія, чиста вода [1].

Відповідно до міжнародних тенденцій та програм реструктуризації вугільної галузі кількість запланованих до ліквідації шахт в Україні постійно зростає. За останніми оцінками, на території країни вже існує та з'явиться в найближчому майбутньому близько сотні шахт, які несуть значну загрозу навколишньому середовищу, призводять до великих втрат робочих місць, і при цьому потребуватимуть значних витрат на підтримання їх гідродинамічної безпеки. Разом з тим, ці підприємства є сховищем величезних ресурсів теплової енергії, зосередженої в шахтних водах та породному масиві, які, незважаючи на позитивний світовий науково-практичний досвід розробки (Німеччина, Нідерланди, Іспанія, Словенія, Болгарія і Великобританія) [2], в даний час практично не використовуються.

Необхідно також відзначити що, на етапі згорання гірничих робіт та у пост-експлуатаційний період, питання водорегулювання стає критичним як для рентабельності закриття підприємства, так і для підтримання його екологічної та технічної безпеки. Ці питання є найскладнішими за прогнозованістю і керованістю процесів інтенсивного техногенного перетворення гірничого масиву. У природному стані існує чітка вертикальна зональність підземної гідросфери за інтенсивністю водообміну. Вона порушується при веденні гірничих робіт внаслідок деформацій гірничого масиву, тому зона інтенсивного водообміну занурюється [3]. Це призводить до активізації зв'язку між гірничими виробками та водами покривних відкладень, поверхневими водотоками, збільшення водопритоку та виснаження ресурсів прісних вод.

Метою даної роботи є обґрунтування ефективних та гідродинамічно безпечних технологічних способів освоєння теплового ресурсу закритих шахт за допомогою зміни їх енергетичного профілю з встановленням геотермальних модулів різних конструкцій.

2. МЕТОДИКА

На сьогоднішній день використовуються кілька схем вилучення низькопотенційної теплової енергії закритих шахт (табл. 1, рис. 1) [4–6]. Найбільш поширені геотермальні циркуляційні системи відкритого типу з подальшим скидом термічно використаної води або до гідрографічної мережі

після очищення, або до підземних виробок без очищення. Крім того, на шахтах, де відсутній водовідлив, використовуються системи закритого типу, де спеціальна рідина-теплоносіє циркулює в геотермальній зонді.

Геотермальні модулі на непрацюючих шахтах являють собою закриті або відкриті технологічні системи призначені для відбору і використання теплової енергії зосередженої в шахтних водах і породному масиві за допомогою різних видів теплообмінників, теплових насосів та іншого обладнання. Крім вилучення тепла, геотермальні модулі здатні тимчасово накопичувати тепло або холод в підземних виробках. Відстані між елементами модулю залежать від розташування гірничих виробок та обладнання на конкретних шахтах, а показники ефективності та гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод визначаються термодинамічними та гідрогеологічними розрахунками або моделюванням.

Основні принципи технологічної схеми геотермального модулю на основі відкритої системи для утилізації тепла з шахтної води полягають у наступному. Для попередження підтоплення території навколо шахти потрібен систематичний відбір шахтних вод із затоплених гірничих виробок за допомогою свердловин чи потужностей існуючого водовідливу.

Максимальна ефективність роботи свердловин досягається при суміщенні їх стовбурів з магістральними виробками. Підйом води здійснюється за допомогою електричних ентр об'їжних насосів (наприклад, General Electric, Centrilift, Новомет), застосування яких обґрунтовано досвідом експлуатації в агресивних рідинах з розчиненими солями, газами і механічними домішками. Насоси даного типу характеризуються простотою наземного обладнання, тривалим міжремонтним періодом експлуатації (2–3 роки), великою глибиною відбору (до 4 км) і значним максимальним дебітом (до 10000 м³/добу).

Таблиця 1. Варіанти геотермальних модулів з використанням тепла закритої шахти

Тип геотермального модуля	Джерело геотермальної енергії	Розташування	Теплова потужність	Споживачі
Закрита система з U-подібними та коаксіальними зондами	Шахтні води та породний масив	Відкриті для доступу дегазаційні свердловини та інші вертикальні виробки діаметру до 400 мм на підроблених територіях поблизу шахтного відводу	До 100 кВт	Житлові будинки та адміністративні будинки приватного сектору з опалювальною площею до 1000 м ²

Тип геотермального модуля	Джерело геотермальної енергії	Розташування	Теплова потужність	Споживачі
1) Закрита система з U-подібними та коаксіальними зондами; 2) Відкрита циркуляційна та безповоротна система	Шахтний водовідлив відсутній або не перевищує 1 млн. м ³ /рік	Шахтні стволи з відкритим доступом, де можливе встановлення циркуляційної геотермальної системи	0.1–1 МВт	Житлові будинки та адміністративні будинки приватного сектору з опалювальною площею понад 1000 м ²
Відкрита циркуляційна та безповоротна система	Шахтний водовідлив понад 1 млн. м ³ /рік	Місця скиду шахтних вод до ставків та водотоків	Понад 1 МВт	1) Існуючі споживачі: багатоповерхові будинки з опалювальною площею понад 1000 м ² ; 2) потенційні нові споживачі: плавальні басейни, теплиці.

Після надходження шахтних вод на денну поверхню вони мають температуру, яка близька до температури гірничих порід на глибині їх відбору. Шахтні води подаються в проміжний теплообмінник, всередині якого циркулює теплоносій.

Віддавши тепло теплоносію і охолонувши, шахтні води або очищаються та направляються до гідрографічної мережі (безповоротна система), або повертаються до підземних виробок верхніх горизонтів (циркуляційна система). Теплоносій з проміжного теплообмінника надходить до міжтрубного простору випарника теплового насоса, де охолоджується як низькопотенційне джерело енергії, і знову направляється в теплообмінник. Вироблена насосом тепла енергія подається споживачу через опалювальний контур і гаряче водопостачання. Для покриття піків споживання теплової енергії будівлями в холодну пору року, коли теплової потужності геотермального модуля може виявитися недостатньо, використовується додаткова котельня, яка працює на традиційних енергоносіях (вугілля, газ).

Запропонована технологічна схема використання шахтних вод як основа геотермального модуля має ряд переваг, у тому числі екологічних (контроль рівня підземних вод шляхом регулювання витрати відбору води, зниження впливу на навколишнє середовище через економію викопного палива) і енер-

гетичних (опалення будівель). Однак для практичної реалізації схеми необхідно виконати техніко-економічне обґрунтування ефективності її роботи, завдання якого полягають у наступному:

- оцінити максимально можливий тепловий потік, що виникає при відборі підземних вод з різних горизонтів шахти;
- визначити коефіцієнт перетворення теплових насосів залежно від температури вод;
- виконати порівняльний аналіз використання шахтних вод в теплових насосах з іншими видами низькопотенційних джерел теплової енергії;
- шляхом визначення витрат електроенергії на роботу відцентрового і теплового насоса, а також вартості виробленого ними тепла, оцінити економічний ефект від роботи запропонованої геотермальної системи;
- кількісно оцінити запобігання викидів CO_2 за рахунок застосування теплових насосів і параметрів регулювання скиду шахтних вод, що забезпечують їх мінімальний вплив на поверхневі водотоки.

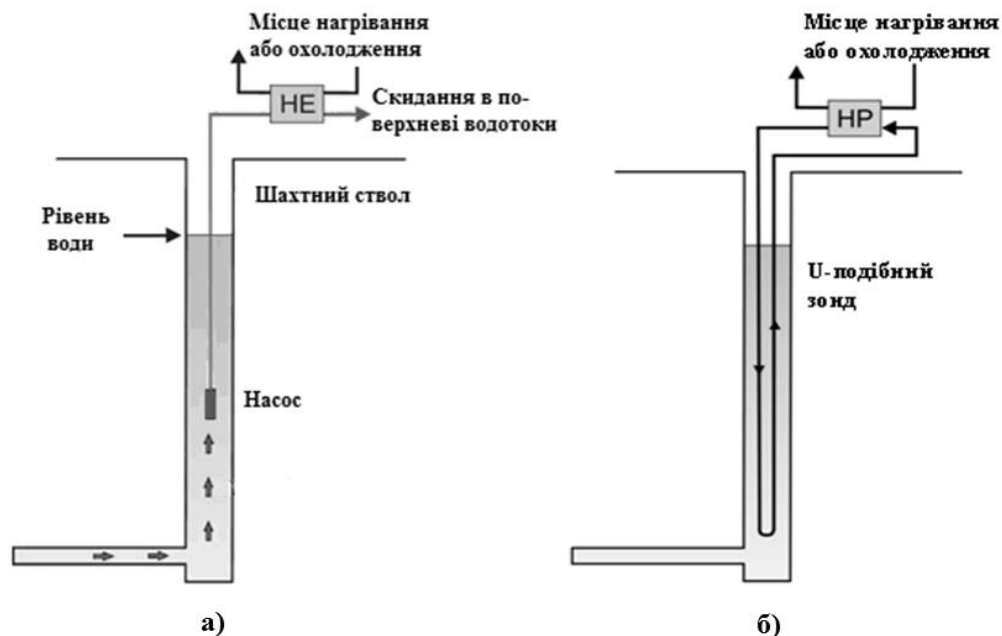


Рисунок 1. Геотермальний модуль на основі відкритої (а) та закритої (б) системи [6]: НЕ – теплообмінник; НР – тепловий насос

Принципова загальна схема геотермального модулю на основі закритої системи, встановленого на закритій шахті, включає розташовані в вертикальних гірничих виробках коаксіальні або U-подібний зонди, в яких циркулює теплоносій (наприклад, 25-38% водний розчин етиленгліколю). На виході з теплового насоса теплоносій має температуру, яка нижче температури оточуючих шахтних вод, гірничих порід або матеріалу для закладення виробленого простору.

Теплова енергія з порушеного породного масиву, який повністю або частково затоплений, нагріває теплоносій. Нагрітий теплоносій надходить у випарник теплового насоса, віддає тепло і знову нагнітається в зонд. Отримана

насосом тепла енергія подається споживачу через опалювальний контур і в систему гарячого водопостачання. Для покриття піків споживання теплової енергії будівлями в холодну пору року використовується додаткова котельня, яка працює на традиційних енергоносіях (вугілля, газ).

Обґрунтування щодо адаптації конструктивної схеми геотермального модулю до конкретних геолого-гідрогеологічних та гірничотехнічних умов мають включати такі етапи.

1. Визначення ємності затоплених підземних виробок, припливів води з окремих горизонтів для оцінювання температури води на шахтному полі.

2. Визначення потреб у тепловій енергії та охолодженні приміщень влітку для існуючих споживачів. Оцінка можливостей розміщення нових споживачів теплової енергії, зокрема, теплиць чи басейнів.

3. Оцінювання раціональних глибин, встановлення геотермальних модулів та визначення їх типів (відкриті чи закриті систем, діапазон встановлення чи глибина й витрата відбору води) за критерієм можливості використання теплової енергії в місцевих кліматичних умовах.

4. Розрахунок теплових насосів для нагріву та охолодження.

Експлуатація геотермальної циркуляційної системи в режимі опалення або охолодження приміщень пов'язана з відбором певного об'єму води для термічного використання на поверхні в теплообмінниках. Витрата відбору шахтних вод має бути обґрунтована не лише потребами споживачів та наявною потужністю, але також і з точки зору підтримання гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод, насамперед поблизу вертикальної виробки (стволі чи колишній дегазаційній свердловині), куди вода скидається після використання, а також на шахтному стволі, де вода відбирається.

За наявності відповідної інфраструктури (трубопроводів та насосних станцій) доцільно розглянути альтернативний варіант скиду охолодженої води до іншого шахтного ствола чи вертикальної виробки на певній відстані від місця відбору, що забезпечить її нагрів в процесі фільтрації до насосу та дозволить підтримувати гідродинамічний баланс в межах шахти.

Попередні оцінки витрати відбору води Q можуть бути виконані, виходячи з теплових потреб, на основі формули

$$Q = \frac{q}{C_m \rho_f \Delta T}, \quad (1)$$

де q – тепла потужність, що має бути забезпечена модулем; C_m – масова теплоємність води; ρ_f – густина води; ΔT – різниця температур при термічному використанні води в теплообміннику.

Розрахована за формулою (1) витрата Q буде змінюватися протягом року пропорційно до змін теплової потужності q , яка зменшується в літній період і зростає у зимовий. Внаслідок змінного в часі відбору теплих та скиду охолоджених шахтних вод рівень підземних вод навколо місць відбору та скиду також буде змінюватися, як показано на рис. 2.

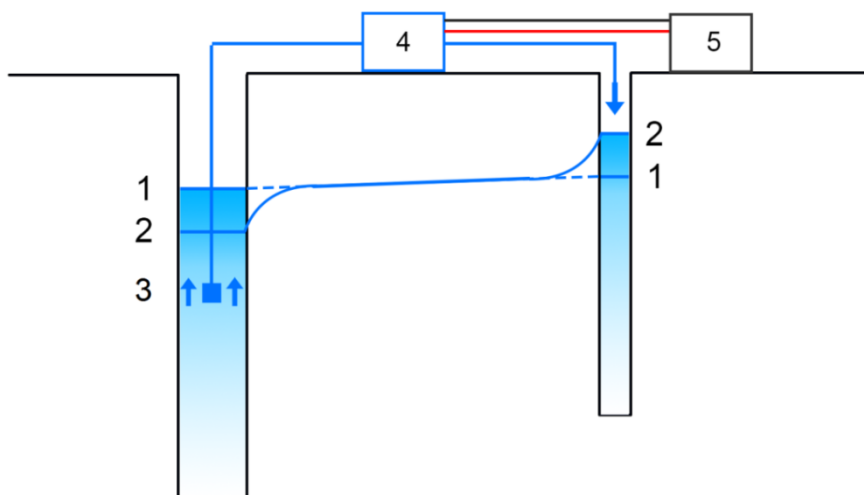


Рисунок 2. Схема відбору та скиду шахтної води в геотермальній циркуляційній системі зі зміною рівня шахтних та підземних вод: 1 та 2 – рівень шахтних вод до та під час експлуатації геотермального модуля відповідно; 3 – насос; 4 – теплообмінник; 5 – споживач теплової енергії

При цьому рівень шахтних та пов'язаних з ними підземних вод з більшою мінералізацією біля місця їх скиду до шахти може досягти підшови прісного водоносного горизонту, який може використовуватися для місцевого водопостачання. Зі світової практики контрольованого затоплення шахт рекомендовано підтримувати рівень шахтних вод нижче базису ерозії, або нижче рівня підшови самого нижнього водоносного горизонту, який використовується для водопостачання [7, 8]. Цей гідродинамічно безпечний рівень води дозволяє мінімізувати витрати на відкачку й уникнути змішування підземних питних та мінералізованих шахтних вод, а також попередити підтоплення, яке спостерігається на територіях колишнього вуглевидобутку після припинення водовідливу [9].

За наявності детальних даних щодо геометрії виробок, розподілу виробленого підземного простору за глибиною та площею, фільтраційних параметрів, перетоків із сусідніми шахтами має виконуватися чисельне моделювання тепломасоперенесення. Для попередніх розрахунків локальної зміни рівня шахтних та підземних вод може бути використані аналітичні залежності.

Наприклад, підйом рівня підземних і шахтних вод навколо вертикальної виробки, через яку скидається термічно використана вода, можна наближено оцінити за формулою зміни рівня води в умовах кусково-сталого дебіту свердловини [10]:

$$S = \frac{Q_t}{4\pi Km} R_c, \quad R_c = -\sum_{j=1}^n \frac{Q_j - Q_{j-1}}{Q_t} E_i \left(-\frac{r^2}{4a(t-t_{j-1})} \right), \quad (2)$$

де Q_t – максимальна або взагалі деяка фіксована витрата свердловини протягом усього періоду відкачування; Q_j – витрата в інтервалі часу j , $j = 1, 2, \dots, n$; n – кількість інтервалів зміни витрати відбору; r – відстань від осі свердловини

до точки розрахунку; K – усереднений коефіцієнт фільтрації затопленого породного масиву, порушеного гірничими роботами; m – потужність обводненої зони в затопленому масиві; a – рівнепровідність, $a = Km/n_a$; n_a – дефіцит водонасичення гірничих порід або вільна пористість.

Кількісні показники фільтрації і витрати шахтних вод (відкриті системи) або теплоносія (закриті) суттєво впливають на теплопродуктивність геотермальних модулів і техніко-економічні показники їх роботи. Тому інвестиційні проекти, бізнес-плани, технологічні регламенти та інша проектна документація, необхідна для створення та експлуатації модулів, має базуватися на гідрогеологічних даних та конструктивних параметрах. Специфіка встановлення геотермальних модулів полягає в тому, що необхідно визначити тепловий ресурс ділянки надр, яка не має чітко окреслених меж. Для випадку непрацюючих шахт він може бути визначений трьома групами факторів:

- природними, головним чином, гідрогеологічними та геотермальними умовами;
- геотехнологічними (гірничотехнічними) параметрами;
- техніко-економічними показниками.

Тому на стадії проектування геотермальних модулів необхідно достовірно оцінити діапазони основних параметрів, частина яких може бути задана директивно, а решта розрахована за функціональними залежностями.

Геологічні та геотермальні умови непрацюючих шахт описані в [11]. Зокрема, показано, що для районів розташування шахт Донбасу значення геотермічного градієнту коливаються від 0,027 до 0,039°C/м. До технологічних параметрів відносяться глибина і розміри гірничих виробок, відстань між ними, потужність зони обводнення, продуктивність і конструкція системи шахтного водовідливу, ємність підземних виробок, розташування та ємність ставків-відстійників шахтних вод, довжина і пропускна здатність теплотрас в межах шахтного поля і прилеглих територій, системи опалення тощо. Ці та інші параметри або їх очікувані інтервали задаються, виходячи з наявної на закритій шахті матеріально-технічної бази та інфраструктури. Енергетичні параметри характеризують виробничу потужність геотермального модуля; балансові співвідношення між кількістю виробленої ним теплової енергії і температурою циркулюючого теплоносія в підземному контурі, технічного теплоносія в поверхневих теплових системах підігріву або термічної трансформації і мережевого теплоносія у споживача. Ці параметри, з одного боку, обмежуються геологічними, геотермальними й геотехнологічними умовами шахтного поля, з іншого, лімітуються споживачем або розраховуються для досягнення оптимальних показників.

Для проектування і експлуатації геотермальних модулів в межах непрацюючої шахти необхідно обґрунтувати раціональні показники відповідно до природних умов і технологічних параметрів, які надалі підлягають оптимізації за економічними критеріями на основі розрахунків. Для цього можна скористатися рівняннями для експрес-розрахунків основних параметрів і показників геотермальних систем, розроблених для різних технологій використання геотермальної енергії [12, 13]:

- оптимальна теплова потужність (ГДж/год):

$$Q = -aH^3 + bH^2 - cH + d; \quad (3)$$

$$a = 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot T^2, 295; b = 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0,38 \cdot T + 7,269;$$

$$c = 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0,698 \cdot T + 16,232; d = 1,846 \cdot T - 37,8;$$

– річна економія (т у.п):

$$S_{\text{ек}} = a \cdot T \cdot b; \quad (4)$$

$$a = 5,13 \cdot 10^{-5} \cdot e(0,254 \cdot H); b = -0,119 \cdot H + 4,4;$$

– питомі капіталовкладення на будівництво (тис. умов. од./ГДж/год):

$$K = -a \cdot T^2 - b \cdot T + c; \quad (5)$$

$$a = -0,00317 \cdot H^3 + 0,01595 \cdot H^2 + 0,01272 \cdot H - 0,0052;$$

$$b = 4,128 \cdot H - 1,6341; c = 27,285 \cdot H^3 - 164,04 \cdot H^2 + 431,96 \cdot H - 175,94;$$

– чиста дисконтна вартість NPV (тис. умов. од./ГДж/год):

$$NPV = -a \cdot \ln(T) - b, \quad (6)$$

$$a = 6,0268 \cdot H^3 - 33,501 \cdot H^2 + 60,809 \cdot H - 7,205;$$

$$b = 24,595 \cdot H^3 - 135,05 \cdot H^2 + 249,29 \cdot H - 60,86,$$

де a, b, c, d – чисельні коефіцієнти; H – глибина відбору шахтних вод, км; T – температура шахтних вод, °C; 1 умов. од. = 1 долару США.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

Виконаємо далі оцінку зміни рівня води та можливість досягнення ним підошви водоносного горизонту з прісною водою для умов затопленої шахти «Новгородівська 2». Усереднені значення фільтраційних параметрів були визначені на основі результатів вирішення зворотних задач геофільтрації при епігнозі відновлення рівня шахтних вод після відключення водовідливу і становлять [11]: коефіцієнт фільтрації $K = 0,08-0,1$ м/добу, потужність зони обводнення $m = 400-550$ м, $n_a = 0,05-0,08$.

При розрахунках за формулами (1)–(2) проаналізовані два варіанта зміни теплової потужності протягом року. Варіант 1 передбачає відбір води з температурою 17 °C з витратою 515 м³/добу, що дозволяє досягти теплової потужності 275 кВт в опалювальний період, варіант 2 – відбір води з витратою 70 м³/добу в неопалювальний період. Результати розрахунків за цими варіантами представлені в табл. 2. та на рис. 3. У табл. 2. позначено ΔH_{max} – максимальний підйом води на відстані 20 м від місця скиду; $\Delta H_{\text{max},p}$ – рівень води після зменшення відбору перед початком нового циклу на відстані 20 м від місця скиду. Розрахунки виконані для мінімальних значень з діапазону фільтраційних параметрів K, m , та n_a , за яких оцінюваний підйом рівня води буде максимальним.

Таблиця 2. Результати розрахункової оцінки підвищення рівня підземних вод навколо місця скиду термічно використаної води

	T, C	$Q, \text{м}^3/\text{добу}$	$q, \text{кВт}$	Місяці року	$\Delta H_{\text{max}}, \Delta H_{\text{max,p}}, \text{М}$
Варіант 1	17	515	275	XI, XII, I, II, III	8,1
Варіант 2		70	37	IV, V, VI, VII, VIII, IX, X	1,8

Якщо врахувати дренажний ефект відбору еквівалентного об'єму води на відстані 200–300 м від місця скиду та більші значення фільтраційних параметрів, то загальний підйом рівня виявиться меншим, ніж формується на кінець опалювального сезону, як показано на рис. 3.

Скидання води через вертикальну виробку призведе до тимчасового підйому рівня води протягом опалювального сезону, після чого рівень відновиться практично до попередніх значень. Прогнозоване підвищення рівня підземних вод до 12 м (рис. 3) не досягне положення підшви нижнього водоносного горизонту над вуглевмісними породами, оскільки наразі дзеркало підземних вод на шахті «Новгородівська 2» знаходиться на рівні від +121 м до +125 м, а підшва водоносного горизонту – на позначці від +150 м до +160 м [14]. Отже, попередньо можна стверджувати, що при відборі шахтних вод їх рівень залишається в гідродинамічно безпечному діапазоні, і дозволяє уникати змішування більш солоних шахтних з водами вище розташованого водоносного горизонту. Крім того, при меншій потребі в тепловій енергії у березні та листопаді витрату відбору води можна зменшити на 20–25%. Для остаточного висновку щодо гідродинамічно безпечного рівня шахтних вод на ділянці розміщення геотермального модулю має проводитися чисельне моделювання тепломасоперенесення з урахуванням фільтраційної неоднорідності підробленого масиву, нестационарних режимів експлуатації модулю, конкретних місць відбору та скиду води.

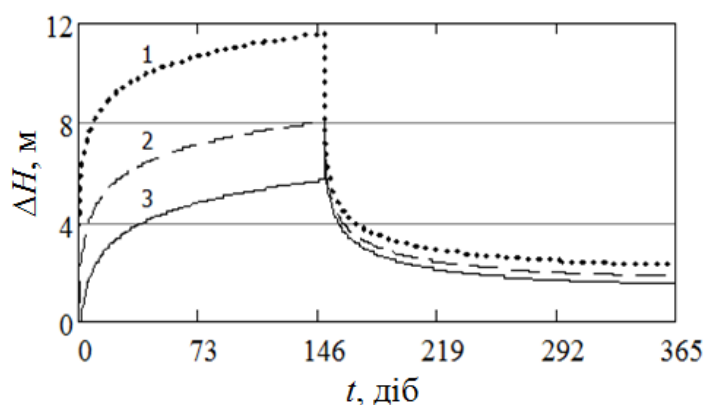


Рисунок 3. Зміна рівня підземних та шахтних вод на різній відстані l від місця скиду протягом року з початку відбору води: 1) $l = 5 \text{ м}$, 2) $l = 20 \text{ м}$, 3) $l = 50 \text{ м}$

За хімічним складом води на даній ділянці сульфатні магневіо-кальцієво-натрієві з помірною мінералізацією $3,1\text{--}3,4\text{ г/дм}^3$ [15], що дозволяє зробити попередній висновок щодо можливості їх використання як теплоносія без значного відкладення твердого осаду на елементах теплообмінників.

При відборі води з шахтного ствола рівень води в ньому знижується (табл. 2, рис. 3). Це призведе до зростання фільтраційного градієнту до 0,1 на лінії течії між місцями відбору та скиду води і прискорення фільтрації охолодженої води до місця відбору зі швидкістю до 0,2–0,3 м/добу. Переміщення охолодженої води до місця відбору протягом інтенсивного відбору становитиме 30–45 м, тобто значно менше, ніж відстань у 300 м між пунктами відбору та скиду. Отже такий режим скиду не призведе до зниження теплової потужності геотермального модулю, з урахуванням того, що скидання охолодженої води здійснюється на поверхню шахтних вод, а відбір – нижче цього рівня. Зниження рівня води в місці відбору не може бути швидко компенсоване у разі скидання до іншого шахтного стволу на значній відстані, тут сформується пониження, за абсолютною величиною близьке до підйому рівня води в місці скиду.

Розглянутий геотермальний модуль може бути інтегровано до системи місцевого теплопостачання через близьке розташування поля шахти «Новгородівська 2» до населеного пункту Новогродівка Донецької області.

На рис. 4 наведені результати розрахунків за формулами (3)–(6) для умов Донбасу. Аналіз графіків показує, що на економічні показники геотермальних модулів суттєво впливають рівень та глибина відбору шахтних вод, температура води та гірничих порід. Теплова потужність та річна економія палива знижуються з глибиною через зростання витрат на прокачування теплоносіїв; питомі капітальні вкладення нелінійно зростають з глибиною.

Залежність інвестицій та прибутку від глибини відбору води обмежує раціональні глибини потенційних місць відбору шахтних вод та встановлення геотермальних зондів: при 23°C це менше 0,9 км, при 25°C – близько 1 км, а при 30°C – 1,1 км. Відбір вод з горизонтів, що знаходяться нижче цих позначок, призводить до від'ємних показників *NPV*, а значить, збитковості проекту. Аналіз гірничо-геологічних та геотермічних умов закритих шахт Донбасу показує, що в разі розташування на їх території геотермального модуля значення *NPV* завжди позитивні і свідчать про те, що протягом усього періоду експлуатації модуль відшкодує капітальні витрати і забезпечить отримання прибутку відповідно до стандарту дисконтної ставки. Звичайно, що ця попередня оцінка має бути уточнена та деталізована розрахунками та моделюванням тепломасоперенесення на конкретних об'єктах.

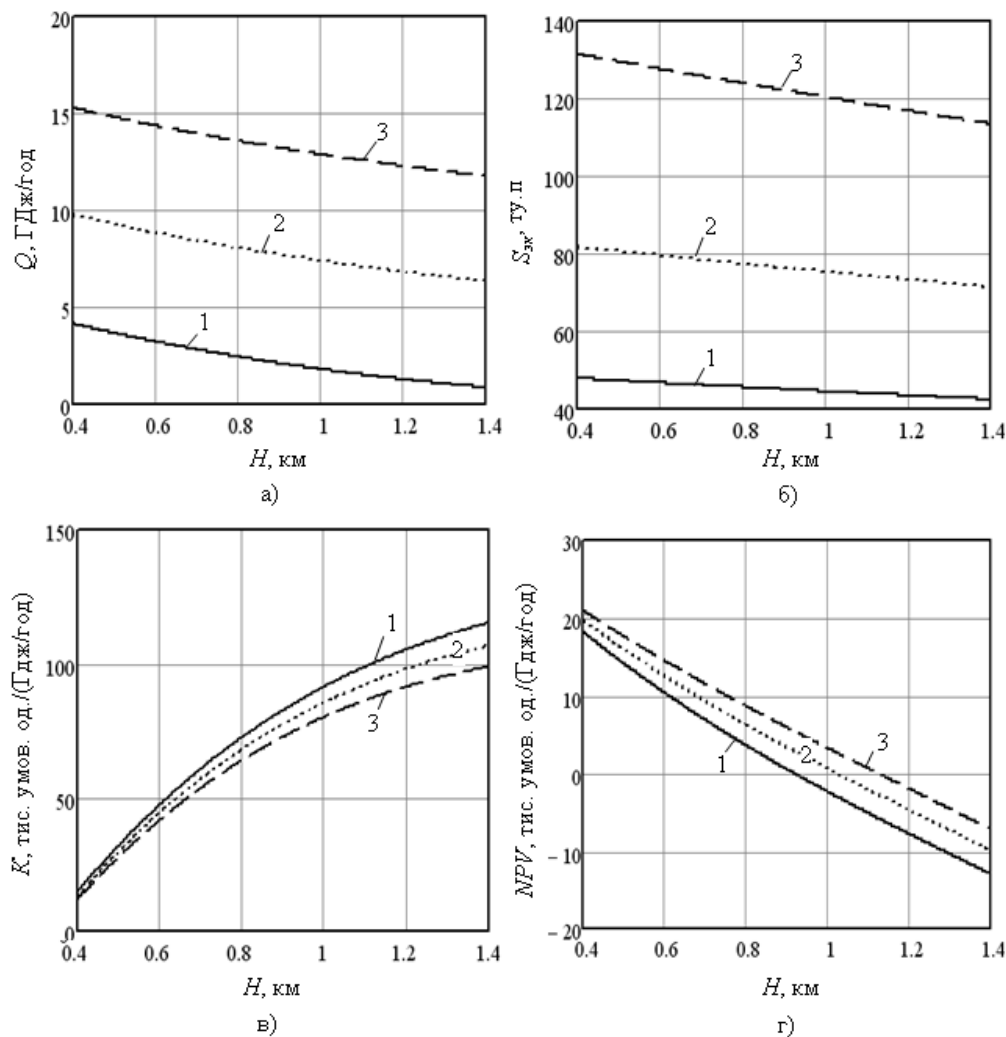


Рисунок 4. Оптимальна продуктивність геотермального модуля (а); річна економія палива від його роботи (б); капіталовкладення в будівництво (в) і чиста дисконтна вартість проекту (г): 1–3 – відповідно при температурі теплоносія 23; 25 і 30°C

Для гірничо-геологічних і теплофізичних умов шахти «Новгородівська 2» за умов відбору води з діапазону глибин $H = 0,5–0,6$ км очікуваний діапазон температури T становитиме 27–29°C при $NPV > 0$ для геотермального модуля. Його проектна теплова потужність становитиме 150–200 ГДж/добу, що відповідає оптимальній продуктивності геотермальних циркуляційних систем на даній глибині (рис. 4, а) і забезпечить економію палива за опалювальний сезон у 80–120 т у. п. (рис. 4, б).

4. ОБГОВОРЕННЯ

На підставі отриманих даних використання теплового ресурсу закритих шахт доцільно проводити за такими етапами відповідно за пріоритетністю та можливістю реалізації.

1. *Встановлення геотермального модулю на існуючому водовідливі* ще працюючих або дренажних шахт шляхом встановлення теплових насосів, які використовують відкачану воду як теплоносії, наприклад, на шахті «Благодатна» у Західному Донбасі. Для цього використовуються існуюча інфраструктура (насосні станції, трубопроводи), додатково може створюватися теплонасосний комплекс біля трубопроводу для відбору тепла; при цьому зростуть витрати електроенергії на роботу теплових насосів, які оцінюються відповідно до коефіцієнту перетворення (COP). Особливістю потужних водовідливів є суттєвий надлишок теплової енергії (до кількох МВт), для використання якого на місці зазвичай недостатньо потреб існуючих споживачів. У разі суттєвого перевищення теплоенергетичного потенціалу водовідливу перспективним є створення на місці нових споживачів, таких, як плавальні басейни та теплиці. Головною екологічною проблемою залишається, як і для працюючих шахт, вплив скиду шахтних вод на якість поверхневих вод.

2. *Встановлення геотермальних зондів в існуючих виробках для опалення невеликих будинків* на територіях поблизу відпрацьованих шахтних полів. Хоча закриті геотермальні системи мають меншу теплову потужність, вони можуть бути використані для опалення та гарячого водопостачання невеликими споживачами потужністю кілька десятків кВт (будинки опалювальною площею до 500 м^2), віддаленими від централізованого опалення. Для цього способу використовуються існуюча інфраструктура з вертикальними виробками, наприклад, колишні дегазаційні та інші свердловини.

3. *Встановлення невеликих циркуляційних відкритих систем* потужністю до 200 кВт для опалення та гарячого водопостачання будівель на території шахт, що використовуються як офісні приміщення. Для цього може бути необхідне створення додаткової інфраструктури для підключення об'єктів для опалення до теплових насосів і прокладення додаткових трубопроводів для шахтної води як теплоносія.

4. *Розширення існуючих циркуляційних відкритих систем та систем на основі шахтного водовідливу* зі збільшенням теплової потужності до кількох МВт.

На етапі розширення теплових потужностей відкритих геотермальних систем з'являється залишковий тепловий ресурс, який доцільно спрямувати на забезпечення тепловою енергією нових споживачів. Найбільш раціональним є будівництво басейнів та створення теплиць, причому витрати теплової енергії на їх експлуатацію повністю можуть бути перекриті ресурсом потужного водовідливу шахтних вод.

Наприклад, витрати тепла для критого басейну площею 300 м^2 при теплових втратах з поверхні води 180 Вт/м^2 та витрати на гаряче водопостачання до 40 кВт (душ, сауна) становлять орієнтовно 100 кВт. Таку теплову потужність можна створити на одному з водовідлив шахт або навіть на основі відкритої циркуляційної системи однієї з шахт, навіть при доволі низькому коефіцієнті перетворення $COP = 3,5$ та споживаною електричною потужністю близько 30 кВт. Такої ж кількості енергії, відповідно до розрахунків, вистачить для обігріву теплиці площею $200\text{--}250 \text{ м}^2$ протягом зимового періоду.

При відборі води з більшої глибини теплові потужності геотермального модулю можна збільшити ще майже вдвічі. При реалізації етапів 3 та 4 окремо має бути обґрунтовано гідродинамічно безпечний рівень шахтних вод; попередньо це можна виконати за методикою, викладеною в цій роботі, а більш детально – гідрогеологічним моделюванням, яке передбачено в наступних роботах авторів.

5. ВИСНОВКИ

В результаті досліджень виконано порівняльний аналіз технологічних схем відкритих (безповоротних і циркуляційних) та закритих (з коаксіальними та U-подібними зондами) геотермальних модулів, які можуть бути встановлені на непрацюючих шахтах Донбасу. За допомогою аналітичних залежностей для цих схем оцінені параметри відбору шахтних вод, які забезпечують їх гідродинамічно безпечний рівень, передусім поблизу вертикальної виробки, через яку вода скидається в шахту після термічного використання. На типовому прикладі показано порядок визначення та оцінки зони підвищення рівня підземних вод, який не досягає підосви водоносного горизонту, що може використовуватися для місцевого водопостачання.

За допомогою загальносвітових економічних критеріїв (чиста дисконтна вартість, внутрішня норма прибутку, термін окупності) виконана оцінка економічної ефективності застосування геотермальних модулів на закритих шахтах Донбасу. Встановлено, що на економічні показники геотермальних модулів суттєво впливають рівень та глибина відбору шахтних вод, температура води та гірничих порід. Теплова потужність та річна економія палива знижуються з глибиною через зростання витрат на прокачування теплоносіїв; питомі капітальні вкладення нелінійно зростають з глибиною.

Отримані результати дозволили обґрунтувати способи і показники екобезпечного та економічно доцільного використання геотермального потенціалу ліквідованих вуглевидобувних підприємств шляхом створення модулів, які забезпечують виробництво теплової енергії відповідно до потреб місцевих споживачів.

ВДЯЧНІСТЬ

Це дослідження підтримується Національним фондом досліджень України (проект № 2020.01/0528) в рамках програми «Наука для безпеки людини і суспільства».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ramos, E.P., 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(11). 6783–6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
2. LANUV NRW (2018): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser – Fachbericht 90. Recklinghausen. 154 p.

3. Sadovenko, I., Inkin, O., Dereviahina, N., & Khrypivets, Y. (2019). Actualization of prospects of thermal usage of groundwater of mines during liquidation. *E3S Web of Conferences* 123, 01046. <https://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201912301046>
4. Ramos, E.P., 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>
5. 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.
6. 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.
7. Norvatov, Y.A., Petrova, I.B., Kotlov, S.N., & Saveliev, D.I. (2010). Scientific and methodological principles of the analysis and prediction of hydrogeological conditions of mine abandonment, *International mining conference, Vietnam*, 597–600.
8. Wolkersdorfer, C. (2008). Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. – Springer, 465 p.
9. Мохов, А.В., Химченко, А.Г. & Селиванов, Б.В. (2008). О причинах подтопления земной поверхности в горнодобывающих регионах (на примере Восточного Донбасса). *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, (2), 189–195.
10. Бочеввер, Ф.М., Лапшин, Н.Н., Орадовская, О.Е. & Хохлатов, Э.М. (1976). *Проектирование водозаборов подземных вод*. М.: Стройиздат, 292 с.
11. Sadovenko, I., Inkin, O., & Zagrytsenko, A. (2016). Theoretical and geotechnological fundamentals for the development of natural and man-made resources of coal deposits. *Mining of Mineral Deposits*, Volume 10, Issue 4, 1–10. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.001>
12. Аренс, В.Ж. (2001). *Физико-химическая геотехнология*. М.: Изд-во МГГУ, 656 с.
13. Тихомиров, А.К. (2006). *Теплоснабжение района города*. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 135 с.
14. Улицький, О.А., Єрмаков, В.М., Луньова, О.В. & Бойко, К.С. (2019). До питання оцінки прогнозу змін гідрогеологічних умов техноекосистеми Селидівської групи шахт. *Екологічна безпека та природокористування*, (3), 32–42.
15. Rudakov, D., Inkin, O., Dereviahina, N., & Sotskov, V. (2020). Effectiveness evaluation for geothermal heat recovery in closed mines of Donbas. *E3S Web of Conferences 201, 01008 Ukrainian School of Mining Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101008>

REFERENCES

1. Ramos, E.P., 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(11). 6783–6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
2. LANUV NRW (2018): Landesamt für Natur, Umwelt, und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potenzialstudie warmes Grubenwasser – Fachbericht 90. Recklinghausen. 154 p.

3. Sadovenko, I., Inkin, O., Dereviahina, N., & Khrypivets, Y. (2019). Actualization of prospects of thermal usage of groundwater of mines during liquidation. *E3S Web of Conferences* 123, 01046. <https://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201912301046>
4. Ramos, E.P., 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>
5. 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.
6. 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.
7. Norvatov, Y.A., Petrova, I.B., Kotlov, S.N., & Saveliev, D.I. (2010). Scientific and methodological principles of the analysis and prediction of hydrogeological conditions of mine abandonment, *International mining conference*, Vietnam, 597–600.
8. Wolkersdorfer, C. (2008). Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. – Springer, 465 p.
9. Mokhov, A., Khimchenko, A.G., & Selivanov, B.V. (2008). On the causes of waterlogging of the earth's surface in mining regions (for example, Eastern Donbass) *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 189–195.
10. Bochever, F.M., Lapshin, N.N., Oradovskaya, O.E., & Khokhlatov, E.M. (1976). *Proektirovanie vodozaborov podzemnyih vod*. Moskva: Stroyizdat.
11. Sadovenko, I., Inkin, O., & Zagrytsenko, A. (2016). Theoretical and geotechnological fundamentals for the development of natural and man-made resources of coal deposits. *Mining of Mineral Deposits*, Volume 10, Issue 4, 1–10. <https://doi.org/10.15407/mining10.04.001>
12. Arens, V.Z. (2001). *Physico-chemical geotechnology*. Moskva, Rossiya: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta.
13. Tikhomirov, A.K. (2006). *Teplosnabzhenie rayona goroda*. Khabarovsk, Rossiya: Izdatelstvo Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta.
14. Ulitsky, O.A., Ermakov, V.M., Lunova, O.V., & Boyko, K.Є. (2019). Prior to the assessment of the forecast of changes in the hydrogeological minds of the techno-ecosystem of the Selidivskoy group of mines. *Ecological safety and environmental protection*, (4), 32–42.
15. Rudakov, D., Inkin, O., Dereviahina, N., & Sotskov, V. (2020). Effectiveness evaluation for geothermal heat recovery in closed mines of Donbas. *E3S Web of Conferences 201, 01008 Ukrainian School of Mining Engineering*, 1–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101008>

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Метою даної роботи є обґрунтування ефективних та гідродинамічно безпечних технологічних способів освоєння теплового ресурсу закритих вугільних шахт шляхом встановленням геотермальних модулів різних конструкцій.

Методика базується на використанні аналітичних залежностей для розрахунку відбору шахтних вод з підтриманням їх гідродинамічно безпечного рівня в межах шахтного поля. Крім того, використовуються рівняння для експрес-розрахунків показників вилучення теплової енергії води та гірничих порід при техніко-економічній оцінці геотермальних модулів.

Результати. Обґрунтовані способи, критерії та послідовність встановлення геотермальних модулів на закритих шахтах Донбасу за їх пріоритетністю та можливістю реалізації, які дозволять ефективно використовувати енергетичний потенціал шахтних вод і гірничих порід. Потреби місцевих споживачів у тепловій енергії можуть бути значною мірою задоволені за допомогою геотермальних модулів.

Наукова новизна. Запропонована методика розрахунку основних параметрів і показників геотермальних модулів дозволяє виконувати реалістичну оцінку економічної ефективності в умовах закритих шахт Донбасу. Кількісно показано вплив на економічні показники модулів витрати відбору шахтних вод, температура води та гірничих порід.

Практична значимість. Обґрунтовано способи і критерії екобезпечного та економічно доцільного використання геотермального потенціалу ліквідованих вуглевидобувних підприємств шляхом створення модулів, які забезпечують виробництво теплової енергії відповідно до потреб місцевих споживачів.

Ключові слова: закрита шахта; водовідлив; геотермальний модуль; шахтні води; тепла енергія

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Целью данной работы является обоснование эффективных и гидродинамически безопасных технологических способов освоения теплового ресурса закрытых угольных шахт путём установки геотермальных модулей различных конструкций.

Методика основывается на использовании аналитических зависимостей для оценки отбора шахтных вод с поддержанием их гидродинамически безопасного уровня в пределах шахтного поля. Кроме того, используются уравнения для экспресс-расчетов показателей извлечения тепловой энергии воды и горных пород при технико-экономической оценке геотермальных модулей.

Результаты. Обоснованы способы, критерии и последовательность установки геотермальных модулей на закрытых шахтах Донбасса по их приоритетности, которые дадут возможность эффективно использовать тепловой ресурс шахтных вод и горных пород. Потребности расположенных возле шахт населенных пунктов в тепловой энергии могут быть в значительной степени обеспечены с помощью геотермальных модулей.

Научная новизна. Предложенная методика расчета основных параметров и показателей геотермальных модулей позволяет выполнять реалистичную оценку экономической эффективности в условиях закрытых шахт Донбасса. Количественно показано влияние на экономические показатели модулей расхода отбора шахтных вод, температуры воды и горных пород.

Практическая значимость. Обоснованы способы и критерии экологически безопасного и экономически целесообразного использования геотермального потенциала ликвидированных угледобывающих предприятий путем создания модулей, которые обеспечивают производство тепловой энергии в соответствии с местными потребностями.

Ключевые слова: закрытая шахта; водоотлив; геотермальный модуль; шахтные воды; тепловая энергия

ABOUT AUTHORS

Inkin Oleksandr, Doctor of Technical Science, Professor of Department of Hydrogeology and Engineering geology Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005. Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2A Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49600. E-mail: inkin@ua.fm.

Rudakov Dmytro, Doctor of Technical Science, Head of Department of Hydrogeology and Engineering geology Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005.