

УДК 622.228+[662.97:621.571.22] <https://doi.org/10.37101/ftpgv25.01.008>

**АНАЛІЗ РИЗИКІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ БЕЗПЕЧНОГО  
ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО РЕСУРСУ  
ЗАТОПЛЕНИХ ШАХТ**

Д.В. Рудаков<sup>1</sup>, Ядзюнь Сунь<sup>2</sup>, О.В. Інкін<sup>3\*</sup>,

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Китайський університет гірничого видобутку та технологій, м. Сюйчжоу, Китай

<sup>3</sup>Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

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

**ANALYSIS OF RISKS AND OPPORTUNITIES OF SAFE USE  
OF THE GEOTHERMAL RESOURCE OF FLOODED MINES**

D.V. Rudakov<sup>1</sup>, Yajun Sun<sup>2</sup>, O.V. Inkin<sup>3\*</sup>,

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>China University of Mining and Technology, Xuzhou, China

<sup>3</sup>Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

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

**ABSTRACT**

**The purpose** of this study is to make a comprehensive analysis of potential risks associated with the operation of geothermal systems of various types in flooded mines induced by mining-technical, hydrogeological, hydrochemical, and technical and economic factors.

**Methodology** includes the collection and analysis of data on geothermal, geochemical, flow and other properties of rocks and mine water, as well as mining-technical conditions for extracting minerals, which affect the operation of geothermal systems in flooded mines.

**Results.** We assessed the influence of the risks of different origins on the sustainability of geothermal system performance based on the real experiences of their operation in closed mines in different countries around the world. Risks associated with planning, placement, operation, and economic factors are systematized on the examples of the operation of dozens of geothermal systems in different countries of the world. A typical example shows how energy efficiency depends on the depth and COP based on a criterion defined as the ratio of thermal energy recovered to the thermal equivalent of electrical energy spent on the operation. Closed-

loop systems can be relatively more energy efficient compared to open-loop systems, but due to lower thermal capacity, they may not be economically feasible.

**Scientific novelty.** Through an integrated approach, we estimated the positive and negative impacts of natural and man-made factors on the long-term operation efficiency of geothermal systems, depending on the method of mine water heat recovery, as well as the causes and mechanisms of potential risks that can threaten the sustainable operation of the systems.

**Practical significance.** The analysis made is necessary for comprehensive consideration and timely prevention of risks to be mandatorily included in feasibility studies of geothermal systems in flooded mines to ensure stable, long-term, and environmentally safe operation.

**Keywords:** Flooded mine, mine waters, geothermal systems, operation, risks

## 1. ВСТУП

Серед поновлюваних джерел енергії, які наразі активніше використовуються в різних країнах в рамках переходу до «зеленої енергетики», особливе місце займає тепло надр Землі, яке стабільно надходить до її поверхні та створює потужний потенціал геотермальної енергії. Основними перевагами геотермальних ресурсів є практична невичерпність теплової енергії надр Землі, незалежність виробництва тепла від пори року та умов навколишнього середовища, певна стабільність в умовах коливань світових цін на енергоносії. За експертними оцінками [1], з усіх відновлюваних джерел енергії найнижча ціна за 1 кВт·год виробленої електричної енергії характерна для геотермальних систем (0,02 – 0,1 долара США). Крім того, важливою властивістю геотермальних станцій є практично незмінне електричне і теплове навантаження протягом усього життєвого циклу (англ. *capacity factor*), яке досягає 92% у порівнянні з 90% в ядерній енергетиці, 85% у вугільній, 38% – у наземній вітровій, 20% – у сонячній енергетиці [2]. Ці переваги дозволяють суттєво зменшувати викиди вуглекислого газу і токсичних продуктів згоряння викопного палива в атмосферу.

Однак, незважаючи на численні переваги, освоєння геотермальних ресурсів має також свої проблеми, обумовлені насамперед високою вартістю буріння та обслуговування глибоких геологорозвідувальних та експлуатаційних свердловин. Витрати на їх створення є суттєвою економічною складовою будь-якого геотермального проєкту, оскільки вони можуть становити до 60% усіх витрат на нього. Вартість буріння геотермальних свердловин, оцінена з використанням розрахункових моделей та аналізу реальних витрат на буріння газових та нафтових свердловин, нелінійно збільшується з глибиною і приблизно становить: на 1 км – 1 млн. дол. США, на 2 км – 2,1 млн. дол., на 3 км – 3,9 млн. дол., на 4 км – 6 млн. дол., на 5 км – 7,9 млн. дол. [3].

У цих умовах останнім часом активно розвивається напрямок розробки техногенних геотермальних ресурсів, зокрема, величезних запасів тепла в затоплених шахтах з використанням наявних шахтних стволів, глибоких свердловин, гірничих виробок, систем водовідливу та водоочищення, що дозволяє суттєво знизити капітальні витрати на створення геотермальних сис-

тем та запобігати забрудненню навколишнього середовища. При цьому використання теплового ресурсу шахт вимагає розгляду ряду факторів, які не враховуються під час роботи традиційних гідротермальних та петротермальних теплових та електричних станцій.

Екологічно сталі і технічно безпечне використання їх геотермального потенціалу можливе лише в певних діапазонах параметрів, у межах яких мінімізуються негативні впливи термічного, фізико-хімічного, геомеханічного походження, що знижують ефективність вилучення тепла. До них відносяться коливання температур та швидкості руху рідини, що можуть призвести до геотехнічної нестабільності затоплених виробок через ерозію порід; зниження продуктивності свердловин через кольматацію, корозію; тепловий зв'язок між пунктами відбору тепла та скиду термічно відпрацьованої води, холодними та теплими ореолами [4, 5]. Попередження цих явищ та їх керування мінімізація потребує досконалого вивчення та адекватного врахування позитивного та негативного впливу цих чинників на роботу систем. У зв'язку з цим, метою даної роботи є проведення комплексного аналізу потенційних ризиків пов'язаних з експлуатацію геотермальних систем різних типів на затоплених шахтах обумовлених їх гірничотехнічними, гідрогеологічними та геомеханічними чинниками.

## **2. МЕТОДИКА**

Для досягнення мети дослідження застосовано комплексний підхід, що включає збір, систематизацію й аналіз даних про геотермальні, геохімічні, фільтраційні та фізико-механічні властивості породного масиву і шахтних вод, а також гірничотехнічні умові підземної розробки корисних копалин, які впливають на роботу геотермальних систем різних типів на закритих шахтах. Шляхом комплексного підходу встановлено позитивний та негативний вплив цих чинників на ефективність довготривалої експлуатації систем залежно від їх типу, а також механізм виникнення потенційних ризиків, які можуть загрожувати стійкій роботі систем.

Шляхом кількісно-аналітичного зіставлення окремих складових геотермальних систем оцінювався їх вплив на навколишнє середовище та поверхневі водотоки, а також енергетичну ефективність систем залежно від глибини відбору шахтних вод та коефіцієнту перетворення теплового насоса. Достовірність отриманих результатів підтверджується досвідом експлуатації реальних геотермальних систем на закритих шахтах у різних країнах світу.

## **3. РЕЗУЛЬТАТИ**

Виходячи зі світового науково-практичного досвіду [6, 7], геотермальні системи для освоєння теплової енергії затоплених шахт можна умовно поділити на дві групи:

- 1) відкритого типу зі скиданням охолодженої шахтної води, яка використовується як теплоносій, до поверхневих водотоків (безповоротні) або до шахти на певній відстані від місця відбору (циркуляційні);

2) закритого типу у вигляді вертикальних геотермальних зондів або свердловинних теплообмінників (одинарних та здвоєних U-подібних, коаксіальних), де циркулює рідкий теплоносій, і які можуть бути встановлені як у верхній частині заповненого закладкою шахтного ствола, так і занурені у шахтну воду нижче рівня затоплення, а також у свердловини на території шахтного поля.

Для кожного типу геотермальних систем характерні свої технологічні особливості, які відображаються на параметрах їх експлуатації під впливом різних за природою виникнення чинників. При цьому певний чинник може створювати ризик для роботи системи одного типу, та не робити вплив на системи іншого типу. Таким чином, необхідно комплексно розглядати й аналізувати механізм походження та впливу кожного потенційного ризику на роботу геотермальних систем залежно від їх типу та технологічних особливостей.

В огляді [8] ризику, які можуть вплинути на роботу геотермальних систем на затоплених шахтах, умовно поділені на ті, що відносяться до

- 1) планування встановлення систем,
- 2) їх розміщення,
- 3) тривалої експлуатації,
- 4) економічних показників.

Для успішної та безпечної експлуатації геотермальних систем у межах шахти, на стадії планування їх встановлення необхідно ретельно визначити гідрогеологічні, геометричні та термічні характеристики шахти й водоносних горизонтів у її межах. Крім того, потрібно отримати гірничотехнічні дані про об'єм виробленого простору, протяжність, розміри та з'єднання гірничих виробок.

*Відстань до споживачів тепла.* Одним з ключових моментів, який необхідно оцінити при плануванні систем, є близькість розташування відповідного та економічно вигідного споживача теплової енергії, бажано приймаючого її для опалення взимку та охолодження влітку. Недотримання цієї рекомендації може призвести до надмірних втрат вилученого тепла при його транспортуванні. Так, при середній тепловій потужності геотермальної системи на закритій шахті 100 кВт, діаметрі трубопроводу 0,2 м, його підземному розташуванні в ґрунті з температурою  $+10^{\circ}\text{C}$  та нормативних допустимих втратах тепла 13% [9] максимальна відстань до споживача може скласти 1,3 км при температурі теплоносія  $+50^{\circ}\text{C}$  та 1,7 км при температурі теплоносія  $+40^{\circ}\text{C}$ . При цьому, ці відстані можуть скоротитись відповідно до 0,8 км та 1,0 км у разі наземного розташування трубопроводу з температурою повітря  $-10^{\circ}\text{C}$ .

*Властивості гірських порід, матеріалів та шахтних вод.* На ефективність експлуатації геотермальних систем можуть впливати інші критичні фактори, зокрема, водопроникність матеріалу засипки шахти, закритість та ізольованість гірничих виробок, нехтування якими може погіршити або повністю зупинити експлуатації систем. Неадекватний аналіз хімічного складу та газонасиченості шахтних вод, може привести до неправильного підбору матеріалу геотермальних систем, їх корозії та засміченню, що своєю чергою також негативно позначиться на ефективності вилучення тепла. Неврачу-

вання цих факторів призвело до зниження продуктивності свердловин геотермальної системи на шахтах Lumphinnans та Abbotsford Road (Великобританія), зворотному тепловому зв'язку на шахті Springhill (Канада) та надмірних витрат енергії на перекачування вод на шахті Crynant (Великобританія). Проблеми, пов'язані з розчиненим газом у шахтних водах, були зафіксовані на шахті Markham (Великобританія), засміченням та утворенням накипу на трубах – на шахтах Cable Company Building (США) та Mieres (Іспанія), корозією – на шахті Heerlen (Нідерланди), очищенням води – на шахті Czeladz (Польща). Крім того, при експлуатації геотермальних систем на шахтах Lumphinnans і Shettleston виникли проблеми з утворенням вохри внаслідок тривалого використання шахтної води та засміченням нагнітальних свердловин [6].

*Отримання дозволів.* Планування геотермальних систем на закритій шахті потребує отримання дозволів, пов'язаних з відбором та скиданням шахтних вод, використанням геотермальної енергії. Отримання таких дозволів часто неможливо прогнозувати у часі, узгодження перших дозволів може не закінчитися до моменту, коли вже необхідно отримання наступних, які не можна одержати без перших. Витрачання великої кількості часу негативно позначиться на економічних показниках систем та термінах окупності досить значних капітальних витрат на їх створення. Наприклад, неузгодження відповідних дозволів призвело до неможливості довгострокового використання води на шахті Вутом (Польща) та зниження економічних показників розташованої там геотермальної системи [8].

*Розміщення в межах закритих шахт.* Відповідні ризики пов'язані з неповнотою даних та відсутністю чіткого розуміння про положення гірничих виробок у просторі та їх гідравлічний зв'язок між собою. Незважаючи на те, що для більшості шахт в результаті маркшейдерської зйомки, як правило, побудовано адекватні плани гірничих робіт, їх точність з часом могла зменшуватися в результаті розробки незапланованих ділянок, осідання або руйнування гірничих виробок, порушення кріплення та помилок при оцифруванні карт. Все це призводить до неточності виявлення заповнених шахтними водами порожнин у породному масиві під час буріння свердловин та розташування елементів геотермальних систем. Зокрема, при бурінні нових свердловин для відбору шахтних вод на закритій шахті Springhill створені свердловини перетинали дрібні гірничі виробки замість великих (капітальних), які не забезпечували необхідний приплив кількості води, їх подальше використання було припинено [10]. Стосовно геотермальної системи на шахті Сагау (Великобританія) триває дискусія щодо невизначеності гідрогеологічних параметрів та гідравлічного зв'язку виробок, з якими стикаються розвідувальні свердловини, оскільки це безпосередньо впливає на потужність системи [11].

Зважаючи на такий досвід, відбір теплової енергії шахт геотермальними системами має обґрунтовуватися закономірностями теплоперенесення та стійкості оточуючого середовища, а місця розміщення систем – визначатися з урахуванням положення та специфіки джерел тепла, потоків рідини у породному масиві, а також сучасних вимог екобезпеки і рекомендацій щодо мінімізації ризиків виникнення надмірних деформацій або зниження стійко-

сті споруд на денної поверхні, що можливо при інтенсивному відборі шахтних вод.

*Гідродинамічний режим у виробках.* Непередбачувані відхилення від очікуваного гідродинамічного режиму за відсутності надійних механізмів прогнозу створюють ризики експлуатації геотермальних систем у закритих шахтах. Застосування класичної теорії фільтрації підземних вод [5] не є припустимим у випадку їх течії навколо взаємопов'язаної мережі гірничих виробок. Рух шахтних вод в цих умовах складно прогнозувати, що потребує застосування трудомістких методів чисельного моделювання в спеціальному програмному середовищі. Невідповідні реальності розрахунки гідравлічної течії шахтних вод можуть призвести до суттєвих відхилень прогнозних дебітів та поглинаючої здатності свердловин від фактичних значень. Подібні труднощі спостерігалась на шахті Nest Road (Великобританія), де видобувна свердловина досягла відпрацьованого горизонту і не забезпечила очікуваної витрати шахтних вод [12].

*Шкідливі домішки у шахтних водах.* Тривале використання забруднених шахтних вод може призвести до різного типу пошкоджень елементів геотермальних систем. Загалом, шахтні води містять забруднювальні речовини й домішки органічного, мінерального та бактеріального походження. Органічні забруднення відбувається при контакті шахтних вод з частинками чистого вугілля, мінеральними маслами, які застосовуються для машин і механізмів, продуктами життєдіяльності живих організмів та розкладання деревини, основною складовою яких є вуглець. Ці забруднення перебувають у шахтних водах у розчиненому та зваженому стані, а їх кількість оцінюється окиснюваністю, біохімічної (БПК) та хімічної (ХПК) потребою в кисні. При цьому значення цих параметрів може змінюватися в досить широких межах. Так, величина окиснюваності шахтних вод Донбасу знаходиться в межах 6,5–40 мг  $O_2/дм^3$ , БПК<sub>5</sub> (п'ятидобове значення) – 0,2–110 мг  $O_2/дм^3$ , ХПК – 5–250 мг  $O_2/дм^3$ . Вміст нафтопродуктів у шахтних водах змінюється від 0 до 50 мг/дм<sup>3</sup> та більше.

Зважені нерозчинні забруднення у шахтних водах, що представлені вугільними та породними частинками, речовинний склад яких відповідає складу викопного вугілля та вміщувальних порід, знаходяться у вигляді грубодисперсних суспензій з розміром частинок 100 мкм, а також суспензій та колоїдних суспензій з розміром частинок відповідно від 100 до 0,1 мкм і від 0,1 до 0,001 мкм. Аналіз складу вод з 177 шахт Донбасу показав, що загальна кількість завислих речовин може бути від 30 до 2500 мг/дм<sup>3</sup>, при цьому у водах 87% шахт ця величина знаходиться у межах 50 – 600 мг/дм<sup>3</sup> [13].

Зміст мікроелементів у шахтних водах обумовлений їх кількістю у підземних водах вугленосних відкладів та процесами вилуговування та міграції елементів з гірських порід у шахтні води. Так, на шахтах Донбасу виявлено близько 30 хімічних елементів, що переважно відповідає кількості мікроелементів підземних вод вугленосних відкладень. Ряд мікроелементів, таких як Al, Mn, Cu, S, Sr, містяться у шахтних водах у більших кількостях порівняно з їх умістом у підземних водах. Крім того, вміст окремих мікроелементів у шахтних водах значно перевищує гранично допустимі концентрації.

Наприклад, кількість солей барію та стронцію у шахтних водах Рурського вугільного басейну (Німеччина) досягає кілька мг/дм<sup>3</sup> [13].

Мінеральні забруднення в шахтних водах знаходяться в розчиненому та зваженому стані. Сума мінеральних речовин змінюється дуже значно навіть у межах однієї шахти, проте кожен вугільний басейн характеризується певним інтервалом зміни мінералізації шахтних вод. На Донбасі зустрічаються шахтні води від слабо солонцюватих (1–3 г/дм<sup>3</sup>) до солоних (10–25 г/дм<sup>3</sup>), а окремі шахти Західного Донбасу характеризуються сильно соленими (25–50 г/дм<sup>3</sup> і більше) водами. В цілому ступень мінералізації шахтних вод зі збільшенням глибини зростає. Так, на Тернівській групі шахт Західного Донбасу з переходом гірничих робіт на кожен нижчий горизонт солеміст збільшується на 3–5 г/дм<sup>3</sup> [13].

Бактеріальне забруднення шахтних вод обумовлено наявністю в них великої кількості мікроорганізмів, що є наслідком потрапляння у воду продуктів гниття деревини та живих організмів. Це створює сприятливе середовище для розвитку бактерій, серед яких можуть бути патогенні – шкідливі для організму людини. Ступінь бактеріального забруднення шахтних вод оцінюється колі-титром – кількістю води у мл, в якій виявляється одна кишкова паличка. Зазвичай колі-титр шахтних вод складає 0,01–0,001 мл, і дуже рідко досягає 10–100 мл.

Зазначимо, що відбір шахтних вод із закритих шахт для використання їх теплового ресурсу може значно збільшувати швидкість вод течії, викликати турбулентність їх потоків, що буде посилювати негативну дію згаданих чинників на елементи геотермальної системи. Так, підвищення швидкості фільтрації води може спричинити суспендування та активізацію уламкових частинок, найдрібніші з яких мають проходити через фільтри, встановлені перед теплообмінниками. На шахті Mieres (Іспанія) тверді частинки, в тому числі зерна піриту, були виявлені всередині розібраного для очищення пластинчастого теплообмінника [14].

Більш проблематичним, ніж осідання твердих частинок, є розглянутий вище потенційно небезпечний хімічний склад шахтних вод, зокрема високий вміст розчиненого Fe<sup>2+</sup>, отриманого в результаті окислення піриту або відновного розчинення карбонатів. Найпоширенішою проблемою при цьому є осадження накопичень оксидів заліза (вохри), що може спричинити засмічення трубопроводів та поверхонь теплообмінника, які знизять швидкість потоку теплоносія в геотермальній системі. На шахті Abbotsford Road (Великобританія) вохра накопичувалась протягом кількох місяців у пластинчастому теплообміннику, що вимагало його періодичного промивання розчинами лимонної або щавлевої кислоти [15]. Осідання вохри також відбувалось в теплообмінниках на шахті Mieres, що потребувало їх розбирання та очищення. Вохра може також накопичуватися у свердловинах і насосах, що знижує їх продуктивність та утворення корозійних ніш на поверхні металу.

Не менші ризики у роботі геотермальних систем можуть викликати гази, розчинені в шахтних водах. Дегазація надлишку CO<sub>2</sub> з шахтної води під впливом атмосфери може призвести до підвищення її рН, отже, до прискорення осадження карбонатів і гідроксидів. Розчинений у значних кількостях метан у шахтній воді може спричинити ризик вибуху, якщо його неконтро-

льовано дегазувати, особливо в закритих приміщеннях. Розчинений сірководень у шахтних водах може призвести до корозії для ряду металів, що фіксувалося на свердловинних датчиках на шахті Nest Road [8].

Корозія металевих компонентів (насосів, труб, теплообмінників) геотермальних систем відбувається різними механізмами залежно від хімічного складу вод і типу металу. Однак, вміст у шахтних водах деяких компонентів може істотно її посилити. Так, глибокі шахти часто містять дуже солені води, іноді багаті сірководнем, високі концентрації якого посилюють корозію в усіх типах сталі. Води з високим вмістом сульфідів і хлоридів, що мають високий рівень відновлення, можуть виявитися корозійно активними навіть для нержавіючих сталей внаслідок порушення їх захисного оксидного шару. У неглибоких шахтах при окисленні піриту зазвичай виділяється розчинене залізо, сульфат і кислота. При цьому кислотність і підвищена концентрація «вільного» вуглекислого газу у шахтних водах може виявитися корозійною для вуглецевої та м'якої сталі.

*Скидання в гідрографічну мережу.* При експлуатації геотермальних систем відкритого типу, насамперед, нециркуляційних, шахтні води скидаються до гідрографічної мережу після термічного використання. При цьому вміст деяких елементів в цих водах, наприклад, заліза та марганцю, може знебарвити річища та знешкодити донну фауну. Не менші проблеми гідросфері створюють солі шахтних вод, насамперед хлориди та сульфати, а також радіоактивні елементи (барій або радій). Для запобігання їх негативного впливу на поверхневі водотоки застосовують різні методи пасивного та активного очищення [13]. Однак використання всіх цих методів потребує значних додаткових витрат на закупівлю спеціального обладнання, що негативно впливає на техніко-економічні показники роботи геотермальних систем. Для подолання цієї ситуації у роботі [16] запропонована методика, яка дозволяє розрахувати оптимальні витрати та режими скидання шахтних вод залежно від величини атмосферних опадів, поверхневого та підземного стоку, що дає змогу знизити вплив шахтних вод на гідрографічну мережу без застосування додаткового обладнання.

Проблематика скидання термічно відпрацьованих шахтних вод обумовлена необхідністю підтримання гідродинамічно безпечного рівня підземних і шахтних вод для попередження засолення водоносних горизонтів, які використовуються для водопостачання. При водовідборі слід враховувати особливості підземних течій, потенційні прояви суфозії та кольматації.

*Теплова взаємодія між пунктами нагнітання та відбору води.* В геотермальних циркуляційних системах відкритого типу існує ризик теплової взаємодії між видобувними та нагнітальними свердловинами, який може призвести до істотного зниження температури шахтних вод. Імовірність виникнення такої взаємодії суттєво зростає при незначній відстані між свердловинами, а також наявності між ними гідравлічно поєднаних виробок, водопровідних тріщин та зон підвищеної проникності. Крім того, для геотермальних систем усіх типів існує ризик виснаження теплового ресурсу шахтних вод або породного масиву. Дана ситуація розвивається, коли кількість тепла, що відбирається системою, не компенсується тепловим потоком з надр Землі,



що можливо для безперервної тривалої роботи потужних геотермальних систем на шахтах із незначним значенням геотермічного градієнта.

*Енергетична неефективність.* Енергетичний ефект геотермальних систем визначається співвідношенням кількості теплової енергії, яка виробляється системою, та електричної енергії, яка витрачається на її експлуатації. Електроенергія витрачається на підняття шахтних вод або циркуляцію теплоносія, на транспортування тепла, і залежить від глибини підйому або довжини зонда. Крім того, електроенергія витрачається на роботу теплового насоса відповідно до коефіцієнта перетворення COP.

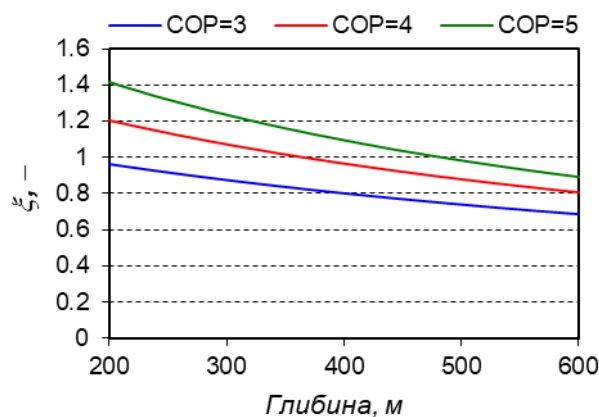
Більш універсальним показником, який може бути використаний для оцінки ефективності геотермальних систем, є енергетичний параметр  $\xi$ , що визначається як відношення отриманої від системи теплової енергії до теплового еквіваленту електричної енергії, що витрачається на роботу теплових насосів і транспортування теплоносіїв. При цьому вважається, що потрібна для роботи електроенергія виробляється шляхом спалювання викопного палива (вугілля чи газу), а тепла потужність, створена на основі шахтної води або теплоносія, порівнюється з тепловою потужністю відповідного виду палива. Цей параметр детально обґрунтовано у [17] і може бути розрахований за формулою

$$\xi = \frac{P_{hp,th} \Delta t_{op} - U_{tr}}{\omega (P_{p,el} + P_{hp,el} + P_{tr,el}) \Delta t_{op}}, \quad \omega = \frac{\eta_h}{\eta_{TRP}}, \quad (1)$$

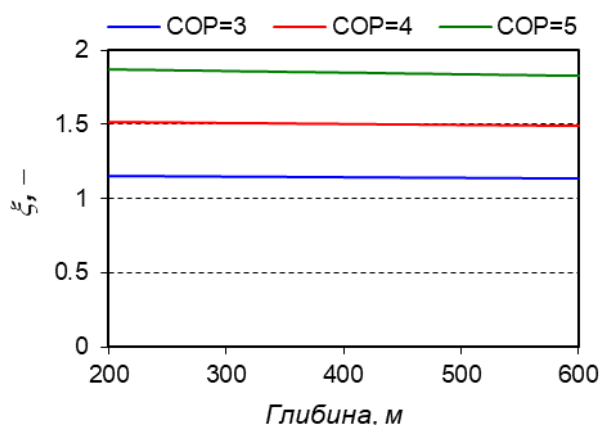
де  $P_{hp,th}$  – тепла потужність геотермальної системи;  $U_{tr}$  – втрати тепла при його транспортуванні;  $P_{mw,el}$ ,  $P_{hp,el}$ ,  $P_{tr,el}$  – відповідно електрична потужність, необхідна для роботи центрових та теплових насосів, а також транспортування електричної енергії;  $\Delta t_{op}$  – час експлуатації системи;  $\omega$  – тепловий еквівалент електричної енергії;  $\eta_h$  – коефіцієнт корисної дії опалювальної системи;  $\eta_{TRP}$  – коефіцієнт корисної дії ТЕС. Виходячи з фізичної суті співвідношення (1), вилучення тепла з шахтних вод буде енергетично ефективним у разі  $\xi > 1$ .

На рис. 1 показано зміну енергетичної ефективності геотермальної системи відкритого типу тепловою потужністю 700 кВт та закритого типу потужністю 70 кВт. Така тепла продуктивність систем є характерною для них, виходячи з реального досвіду їх експлуатації на закритих шахтах [4, 6, 17]. Для системи відкритого типу прийнята різниця температур теплої та охолодженої води 10°C, для системи закритого типу – 4°C.

У системах відкритого типу параметр  $\xi$  змінюється від 0,69 при COP = 3 та глибини відбору шахтних вод 600 м до 1,42 при COP = 5 та глибини відбору 200 м. Очікувана енергоефективність системи знижується зі збільшенням глибини відбору і зниженням коефіцієнта перетворення теплового насоса, що пояснюється збільшенням витрат електричної енергії на відбір шахтних вод та виробництва тепла. При цьому, при глибині відбору вод понад 480 м значення параметра  $\xi$  для системи відкритого типу менше ніж 1 для всіх значень оцінюваного діапазону COP, що свідчить про енергетичну неефективність роботи систем при відборі з таких глибин.



а)



б)

**Рисунок 1.** Зміна енергетичної ефективності геотермальної системи залежності від глибини відбору та коефіцієнта перетворення теплового насоса COP: а) система відкритого типу, б) система закритого типу

Енергетичний параметр систем закритого типу досягає вищих значень: 1,14 при COP = 3 та довжині зонда 600 м і 1,87 при COP = 5 та довжині зонда 200 м, що обумовлено зменшенням витрат електроенергії енергії на циркуляцію теплоносія в замкнутому геотермальном зонді порівняно з підйомом шахтних вод відцентровим насосом на ту ж висоту. Значення параметра  $\xi$  у цих системах в оцінюваних діапазонах глибини і COP вище 1,0 і зменшується на 1,4–2,2% для самої великої глибини порівняно з найменшою глибиною.

Таким чином, системи закритого типу можуть бути відносно більш енергоефективними порівняно з системами відкритого типу, причому мати менше ризиків при їх експлуатації, але через меншу потужність можуть виявитися економічно недоцільними.

*Економічні ризики.* Експлуатація геотермальних систем на закритих шахтах потребує залучення фахівців різного профілю (геологів, гірників, енергетиків, техніків, теплофізиків) для обслуговування їх окремих компонентів, забезпечення стабільної роботи та ремонту систем, вирішення поточних технічних і адміністративних проблем. Очевидно, що з кожним додатковим

підрядником вартість експлуатації геотермальних систем стає більшою, а розподіл відповідальності між окремими виконавцями ускладнюється. Відсутність єдиного центру обслуговування таких систем призводить до того, що реалізація малобюджетних проєктів або систем малої потужності стає економічно недоцільною на енергетичному ринку.

До економічних ризиків експлуатації геотермальних систем слід додати відсутність поблизу закритих шахт постійних потужних споживачів теплової енергії. Дуже часто закриті шахти знаходяться у вугледобувних районах на значній відстані від великих населених пунктів. Це призводить до того, що отриману теплову енергію нікуди постачати неподалік від шахти, а транспортування її на значні відстані пов'язане зі значними втратами тепла і коштів [9].

#### **4. ОБГОВОРЕННЯ**

Зіставлення різних за походженням чинників, які впливають на ефективність геотермальних систем, дозволяє узагальнити їх значимість стосовно певних способів відбору геотермального тепла (табл. 1). Цей результат показує переважно очікувані ризики у типових умовах, але індивідуальні особливості конкретного об'єкту мають бути деталізовані при відповідних техніко-економічних обґрунтуваннях.

Загалом системи закритого типу виглядають більш безпечними й менш вразливими до ризиків, які загрожують їх надійній та тривалій експлуатації. Оскільки в системах закритого типу теплоносій не має безпосереднього контакту з оточуючим середовищем, це суттєво мінімізує негативний вплив шахтних вод та породного масиву на окремі елементи геотермальних систем. Крім того, в геотермальних системах закритого типу через відсутність відбору шахтних вод не виникають додаткові ризики надмірних деформацій споруд на денній поверхні та забруднення поверхневих вод. Теплова взаємодія між свердловинами є типовим ризиком для відкритих циркуляційних систем з активізованою течією підземних та шахтних вод. Разом з тим, для обох типів геотермальних систем залишаються актуальними ризики, пов'язані з віддаленістю споживачів тепла, зменшенням температури теплоносія при його транспортуванні, вчасним отриманням дозволів на встановлення та експлуатацію.

В геотермальних циркуляційних системах відкритого типу, на відміну від безповоротних, відсутній ризик забруднення поверхневих вод токсичними сполуками, що містяться у шахтних водах. З іншого боку, активізація течії у циркуляційних системах може призводити до небезпечних фільтраційних деформацій, зокрема суфозії, що несе певний ризик руйнування споруд на поверхні.

#### **5. ВИСНОВКИ**

В результаті досліджень оцінено ступінь впливу різних за походженням ризиків на стійкість роботи геотермальних систем, яка підтверджується реальним досвідом їх експлуатації на закритих шахтах у різних країнах світу. За допомогою комплексного аналізу природних та техногенних чинників які

впливають на роботу систем та науково-практичного досвіду їх експлуатації схематизовано ризики, пов'язані з плануванням, розміщенням, експлуатацією та економічними показниками систем.

Таблиця 1. Вплив ризиків на ефективність геотермальних систем у закритих шахтах

Ризик		Тип геотермальної системи		
		Відкритий		Закритий
		Безповоротні	Циркуляційні	Геотермальні зонди
Планування	Віддаленість від споживача	++	++	++
	Неточність даних про об'єм виробленого простору	++	++	-
	Неотримання дозволів на експлуатацію	+	+	+
	Неповний/неточний аналіз хімічного складу шахтних вод	++	++	-
Розміщення	Помилки при виявленні заповнених шахтними водами порожнин у породному масиві	+	++	-
	Гідравлічний зв'язок між виробками, який зменшує потужність системи	+	++	-
	Руйнування та засипка свердловин	+	+	++
Експлуатація	Надмірні деформації та зниження стійкості споруд на денній поверхні	+	++	-
	Зниження дебітів свердловин	++	++	-
	Засмічення теплообмінників, насосів і фільтрів частинками різних фракцій	++	++	-
	Корозія металевих компонентів систем	++	++	-
	Забруднення поверхневих вод шахтними водами	++	-	-
	Гідродинамічно небезпечний рівень шахтних вод	++	+	-
	Теплова взаємодія між свердловинами	+	++	-
	Енергетична неефективність	+	+	+
Економічні	Відсутність єдиного центру обслуговування геотермальних систем	+	+	+
	Відсутність постійних потужних споживачів теплової енергії	+	+	+

++ суттєвий ризик, + ризик існує, - ризик незначний або відсутній.

На типовому прикладі затопленої шахти показано зміни енергетичної ефективності геотермальних систем від глибини відбору теплоносія та коефіцієнту перетворення теплового насоса. Встановлено, що енергетичний параметр, який визначається як відношення отриманої від системи теплової енергії до теплового еквівалента електричної енергії, що витрачається на роботу теплових насосів і транспортування теплоносіїв, у системах відкритого типу змінюється від 0,69 при COP = 3 та глибини відбору шахтних вод 600 м

до 1,42 при COP = 5 та глибини відбору 200 м. У системах закритого типу енергетичний параметр досягає вищих значень: 1,14 при COP = 3 та довжині зонда 600 м і 1,87 при COP = 5 та довжині зонда 200 м, що обумовлено зменшенням витрат електроенергії енергії на циркуляцію теплоносія в замкнутому геотермальному зонді порівняно з підйомом шахтних вод відцентровим насосом на ту ж висоту. Загалом для обох типів систем характерно зниження їх енергоефективності зі збільшенням глибини відбору і зниженням коефіцієнта перетворення теплового насоса.

Отримані результати дозволять оцінити можливість виникнення різних ризиків під час довготривалої роботи геотермальних систем на закритих шахтах для їх своєчасного попередження та врахування в проєктах техніко-економічного обґрунтування розміщення та екологічно безпечної експлуатації систем на різних шахтах.

## ВДЯЧНІСТЬ

Представлене дослідження підтримується МОН України в рамках НДР «Технологія очищення, управління та запобігання забруднення шахтних вод» за програмою фінансування спільних українсько-китайських науково-дослідних проєктів у 2023 р.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Салехірадж С.Ш. *Обґрунтування параметрів використання системи відбору геотермальної енергії в умовах глибоких вугільних шахт*: автореф. канд. техн. наук: 05.15.09. Донецьк, 2014. 25 с.
2. Долінський А.А., Халатов А.А. Геотермальна енергетика: виробництво електричної і теплової енергії. *Вісник НАН України*. 2016. № 11. С. 76-86.
3. *The Future of Geothermal Energy in the 21 Century Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States*. Report : Massachusetts Institute of Technology, 2006. 372 p.
4. Rudakov, D., Inkin, O. (2022). A method to evaluate the performance of an open loop geothermal system for mine water heat recovery. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 5-11. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/005>
5. Рудаков Д.В., Садовенко І.О. Прогнозування гідродинамічного режиму при відпрацьовуванні й затопленні шахтного поля. *Вісник ЖДТУ*. 2006. № 1. С. 151-157.
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*. No 5. P. 29-50. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0094-7>
7. 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. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 73, P. 6783-6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>
8. Walls D.B., Banks D., Boyce A.J., Burnside N.M. (2021). A review of the performance of minewater heating and cooling systems. *Energies*, 14, 6215. <https://doi.org/10.3390/en14196215>
9. Олійніченко В.Г. Аналіз технічних вимог до теплотрас геотермального теплопостачання. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 2. С. 65-72.

10. Michel A.F. (2009). Utilization of Abandoned Mine Workings for Thermal Energy Storage in Canada. *In Proceedings of the Effstock conference*, Stockholm, Sweden.
11. Brabham P., Manju M., Thomas H., Farr G., Francis R., Sahid R., Sadasivam S. (2020). The potential use of mine water for a district heating scheme at Caerau, Upper Llynfi valley, South Wales, UK. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 53, 145. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-213>
12. Banks D. (2021). Fessing up: Risks and obstacles to mine water geothermal energy. In Proceedings of the Mine Water Heating and Cooling; A 21st Century Resource for Decarbonisation. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/351450683\\_Fessing\\_up\\_Risks\\_and\\_obstacles\\_to\\_mine\\_water\\_geothermal\\_energy](https://www.researchgate.net/publication/351450683_Fessing_up_Risks_and_obstacles_to_mine_water_geothermal_energy) (accessed on 20 September 2023).
13. Долина Л.Ф. *Стічні води підприємств гірничої промисловості та методи їх очищення*. Д. : Молодіжна екологічна ліга Придніпров'я, 2000. 61 с.
14. Adams C., Monaghan A., Gluyas J. (2019). Mining for heat. *Geoscientist*. № 29, P. 10-15.
15. Steven J. (2021). From Venture Pit to Walker Shore, coal and heat and fathoms of core: Mine water Heat Exploitation in Newcastle/Gateshead. In Proceedings of the 2021 Mine Water Geothermal Energy Symposium, "Mine Water Heating and Cooling – A 21st Century Resource for Decarbonisation", Webinar.
16. Rudakov D., Sun Y., Inkin O. (2023). Optimization of mine water discharge with the river hydrograph. Case study Samara River in Western Donbas. *V International Conference «Essays of Mining Science and Practice»*.
17. Rudakov D., Inkin O. (2022). Validation of the operation efficiency criteria for geothermal probes in flooded mine workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, p. 100-105. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20215/100>

## REFERENCES

1. Salekhiradzh S.Sh. (2014). *Obgruntuvannia parametriv vykorystannia systemy vidboru heotermalnoi ener-hii v umovakh hlybokykh vuhilnykh shakht* : Abstract of the dissertation of a candidate of technical sciences: 05.15.09. Donetsk, 25 s.
2. Dolinskyi A.A., Khalatov A.A. (2016). Heotermalna enerhetyka: vyrobnytstvo elektrychnoi i teplovoi enerhii. *Visnyk NAN Ukrainy*. № 11. S. 76-86.
3. *The Future of Geothermal Energy in the 21 Century Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States*. Report : Massachusetts Institute of Technology, 2006. 372 p.
4. Rudakov, D., Inkin, O. (2022). A method to evaluate the performance of an open loop geothermal system for mine water heat recovery. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 5-11. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/005>
5. Rudakov D.V., Sadovenko I.O. (2006). Prognozuvannja gidrodynamichnogo rezhymu pry vidprac'ovu-vanni j zatoplenni shahtnogo polja. *Visnyk ZhDTU*, (1), 151-157.
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*. No 5. P. 29-50. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0094-7>
7. 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. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 73, P. 6783-6795. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4285-y>

8. Walls D.B., Banks D., Boyce A.J., Burnside N.M. (2021). A review of the performance of minewater heating and cooling systems. *Energies*, 14, 6215. <https://doi.org/10.3390/en14196215>
9. Oliinichenko V.H. (2016). Analiz tekhnichnykh vymoh do teplotras heotermalnoho teplopostachannia. *Vidnovliuvana enerhetyka*. № 2. S. 65–72.
10. Michel A.F. (2009). Utilization of Abandoned Mine Workings for Thermal Energy Storage in Canada. In *Proceedings of the Effstock conference*, Stockholm, Sweden.
11. Brabham P., Manju M., Thomas H., Farr G., Francis R., Sahid R., Sadasivam S. (2020). The potential use of mine water for a district heating scheme at Caerau, Upper Llynfi valley, South Wales, UK. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 53, 145. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-213>
12. Banks D. (2021). Fessing up: Risks and obstacles to mine water geothermal energy. In *Proceedings of the Mine Water Heating and Cooling; A 21st Century Resource for Decarbonisation*. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/351450683\\_Fessing\\_up\\_Risks\\_and\\_obstacles\\_to\\_mine\\_water\\_geothermal\\_energy](https://www.researchgate.net/publication/351450683_Fessing_up_Risks_and_obstacles_to_mine_water_geothermal_energy) (accessed on 20 September 2023).
13. Dolyna L.F. (2000). *Stichni vody pidpriemstv hirnychoi promyslovosti ta metody yikh ochyshchennia*. D.: Molodizhna ekolohichna liha Prydniprovia, 61 s.
14. Adams C., Monaghan A., Gluyas J. (2019). Mining for heat. *Geoscientist*. № 29, P. 10-15.
15. Steven J. (2021). From Venture Pit to Walker Shore, coal and heat and fathoms of core: Mine water Heat Exploitation in Newcastle/Gateshead. In *Proceedings of the 2021 Mine Water Geothermal Energy Symposium, "Mine Water Heating and Cooling – A 21st Century Resource for Decarbonisation"*, Webinar.
16. Rudakov D., Sun Y., Inkin O. (2023). Optimization of mine water discharge with the river hydrograph. Case study Samara River in Western Donbas. *V International Conference «Essays of Mining Science and Practice»*.
17. Rudakov D., Inkin O. (2022). Validation of the operation efficiency criteria for geothermal probes in flooded mine workings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, p. 100-105. <https://doi.org/10.33271/nvngu/20215/100>

## ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Метою даної роботи** є проведення комплексного аналізу потенційних ризиків, пов'язаних з експлуатацією геотермальних систем різних типів на затоплених шахтах, обумовлених їх гірничотехнічними, гідрогеологічними, гідрохімічними та техніко-економічними чинниками.

**Методика** включає збір й аналіз даних про геотермальні, геохімічні, фільтраційні та інші властивості породного масиву і шахтних вод, а також гірничотехнічні умови розробки корисних копалин, які впливають на роботу геотермальних систем на затоплених шахтах.

**Результати.** Оцінено ступінь впливу різних за походженням ризиків на стійкість роботи геотермальних систем, яка підтверджується реальним досвідом їх експлуатації на закритих шахтах у різних країнах світу. На прикладах експлуатації десятків геотермальних систем систематизовано ризики, пов'язані з плануванням, розміщенням, експлуатацією та економічними чинниками. На типовому прикладі показано зміни енергетичної ефективності систем від глибини та параметру COP на основі критерію, що визначається як відношення отриманої від них теплової енергії до теплового еквівалента електричної енергії, що витрачається на експлуатацію. Системи закритого

типу можуть бути відносно більш енергоефективними порівняно з системами відкритого типу, але через меншу теплову потужність можуть виявитися економічно недоцільними.

**Наукова новизна.** Шляхом комплексного підходу встановлено позитивний та негативний вплив природних та техногенних чинників на ефективність довготривалої експлуатації геотермальних систем залежно від способу вилучення тепла з шахтних вод, а також причини й механізми виникнення потенційних ризиків, які можуть загрожувати стійкій роботі систем.

**Практична значимість.** Проведений аналіз є необхідним для всебічного врахування та своєчасного попередження ризиків, що є обов'язковою складовою проєктів техніко-економічного обґрунтування геотермальних систем на затоплених шахтах для стабільної, довготривалої та екологічно безпечної експлуатації.

**Ключові слова:** затоплена шахта, шахтні води, геотермальні системи, експлуатація, ризики

## **ABOUT AUTHORS**

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

Yajun Sun, Professor at the School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, the academic leader of the research team of mine water hazard prevention and management, No.1 Daxue Road, Xuzhou City, Jiangsu Province, China, 221116.

Inkin Oleksandr, Doctor of Technical Science, Professor, Leading Researcher, Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Simferopolskaya Street, Dnipro, Ukraine, 49005. E-mail: inkin@ua.fm