

УДК 622.228+[662.97:621.571.22] <https://doi.org/10.37101/ftpgp24.01.007>

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ШАХТНИХ ВОД І ТЕПЛОПЕРЕНЕСЕННЯ В УМОВАХ ЗАКРИТИХ ШАХТ

Д.В. Рудаков¹, О.В. Інкін^{1, 2*}

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

²Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

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

SIMULATION OF MINE WATER FLOW AND HEAT TRANSPORT IN THE CONDITIONS OF CLOSED MINES

D.V. Rudakov¹, O.V. Inkin^{1, 2*}

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

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

ABSTRACT

The purpose of this study is the development and validation of a numerical model to simulate mine water flow and heat transport in disturbed rocks in the zone influenced by an open geothermal system with the prediction of their energy efficiency indicators under the existing geological and hydrogeological settings and technogenic disturbance of mined-out rocks.

Method is based on using a finite difference model of 3D mine water flow and heat transport through a heterogeneous porous medium. The computational model was created using the ModFlow software intended for solving the simultaneous equations of flow and transport in water-saturated rocks.

Results. For the conditions of mine No.2 "Novogrodivska" we evaluated the temperature range of mine water that is proposed to be selected under the condition of maintaining a safe water level in order to prevent waterlogging and salinization of the shallow aquifer during 25 years of possible operation; the estimated range of 18–21°C is generally consistent with the indicators of the geothermal system at the "Blagodatna" mine in Western Donbas. It has been shown that the slight cooling of withdrawn mine water is expected due to the predominance of heat extraction over geothermal heat inflow from below by the mechanism of replacing warm mine water by colder infiltration water.

Scientific novelty. The developed numerical 3D heat transport model reproduces the spatial heterogeneity of groundwater flow and temperature fields around the

geothermal system in a flooded mine and the evolution of the temperature field at different rates of the infiltration recharge.

Practical significance. The proposed model of heat transport in geothermal systems allows to determine and optimize the operational parameters according to energy efficiency criteria and evaluate changes in the thermal status of rocks and mine waters under different conditions of system operation with maintaining a safe mine water level.

Keywords: closed mine, geothermal systems, mine water, flow, heat transfer, modelling

1. ВСТУП

Державна політика України з енергоресурсозбереження передбачає суттєве розширення обсягів використання нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії з урахуванням екологічної складової. Відповідно до положень «Енергетичної стратегії України на період до 2030 р.» проблемам енергозбереження, використанню відновлюваних джерел енергії і відповідно зменшенню техногенного навантаження на навколишнє середовище приділяється велика увага. В найближчі роки має бути забезпечена економія традиційних паливно-енергетичних ресурсів на рівні 8-10% від їх загального споживання. Завдяки цьому можуть бути зекономлені значні обсяги традиційних енергоносіїв і коштів з державного бюджету на їх одержання за імпортом [1].

Одним із перспективних видів відновлюваних джерел енергії для України, є геотермальні ресурси [2], що характеризуються невичерпністю, незалежністю від пори року та умов навколишнього середовища, відсутністю викидів вуглекислого газу і інших токсичних речовин в атмосферу. Виходячи зі світового науково-практичного досвіду [3], освоєння цих ресурсів доцільно проводити за допомогою геотермальних систем різних типів, ефективність яких суттєво збільшується при сумісному використанні тепла Землі та теплового ресурсу закритих вугледобувних підприємств, кількість яких у нашій країні постійно збільшується.

Експлуатація геотермальних систем на непрацюючих шахтах можлива і добре апробована у деяких країнах за кількома технологічними схемами [4], кожна з яких потребує термодинамічного, гідрогеологічного та техніко-економічного обґрунтування. Проте виконання таких оцінок на практиці викликає ряд труднощів, пов'язаних з неоднорідністю гірських порід в межах шахтного поля та зон ведення гірничих робіт, впливом інфільтрації, зміною температури та рівнів шахтних вод з часом. У зв'язку з цим, метою даної роботи є розробка і верифікація деталізованої чисельної моделі течії шахтних вод та переносу тепла у порушеному гірському масиві в зоні впливу геотермальних систем, для прогнозу показників їх роботи в різних технологічних варіантах та природних умовах.

2. МЕТОДИКА

Підроблений масив вугленосних порід, в якому зазвичай розміщуються геотермальні системи, містить підземні виробки різної геометрії, і по суті, є неоднорідним гідравлічно проникним середовищем, яке містить більш проникні зони – зони ведення гірничих робіт з підвищеною пористістю та проникністю, та менш проникні зони – цілики та зони, де гірничі роботи не проводилися. Концептуально таке середовище може моделюватися кількома підходами [5]:

- 1) як неоднорідне з різною гідравлічною проникністю,
- 2) як неоднорідне з «подвійною пористістю»,
- 3) як сукупність двох середовищ – твердого й рідкого, причому рух води

в останньому описується рівняннями гідромеханіки (Нав'є – Стокса).

Перший підхід є, у певному розумінні, традиційним, він використовувався у ряді досліджень [6] і дозволяє використовувати програмне забезпечення, яке широко використовується при моделюванні течій підземних вод [7]. Основним завданням при цьому є коректна параметризація чисельної моделі, зокрема, визначення проникності та пористості різних частин області фільтрації. Використання схеми «подвійної пористості», в якій вся пористість поділяється на «швидку», яка займає невелику частину об'єму в області фільтрації, та «повільну», яка займає значну частину цього об'єму, є в цілому перспективною. Але визначення критичного параметру моделі «подвійної пористості» – середнього розміру блоку, який суттєво впливає на результат, ще потребує теоретичного обґрунтування для порушеного породного масиву. Крім того, ємнісний параметр «подвійної пористості» більш важливий для перехідних процесів, тоді як експлуатація геотермальних модулів зазвичай здійснюється у стаціонарному режимі. Третій підхід з використанням фактично двох різних моделей, як правило, невиправдано ускладнює чисельний алгоритм розрахунку для великої за простяганням області фільтрації з досить розгалуженою мережею виробок, хоча в масштабі окремих виробок можна отримати цікаві результати, особливо для кількох сполучених виробок, в яких циркулює шахтна вода.

З урахуванням того, що описана раніше гідравлічна модель геотермальної системи [8] може бути застосовна для відносно простих гідрогеологічних та гірничотехнічних умов і доцільна тільки для попередніх оцінок її ефективності, у цій роботі для моделювання течій підземних та шахтних вод буде використовуватися перший підхід, на основі якого буде представлена скінченно-різницева модель течії шахтних вод та теплоперенесення у підробленому масиві гірських порід, що на прикладі конкретного шахтного поля дозволить враховувати складність реальних геолого-гідрогеологічних та гірничотехнічних умов.

Тривимірна течія підземних та шахтних вод через неоднорідне пористе середовище може бути описана рівнянням у частинних похідних [9]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

де K_x , K_y та K_z – значення коефіцієнту фільтрації (гідравлічної проникності) уздовж осей координат x , y і z , які вважаються паралельним до основних осей гідравлічної провідності (поздовжньої та поперечної), м/добу; h – потенціометричний напір, м; W – об’ємний потік на одиницю об’єму, яким відтворюється вплив джерел ($W > 0$) та/або стоків ($W < 0$) води, добу⁻¹; S_s – питома ємність середовища, м⁻¹; $S_s = \frac{1}{V_a} \frac{dV_w}{dh}$, де dV_w – об’єм

води, яка вивільняється або входить з об’єму V_a водоносного горизонту при зміні напору в ньому на dh ; t – час, діб.

Як правило, коефіцієнти рівняння (1) та член W є функціями координат, іноді також і часу.

На внутрішніх та зовнішніх межах області фільтрації у затопленій шахті, як правило, ставляться такі межові умови:

а) змінний у часі та просторі напір на межі, зокрема, у шахтному стволі або у підземній галереї

$$H|_{\Gamma} = H_{\Gamma}(x, y, z, t); \quad (2)$$

б) перетік через бокові межі, наприклад, перетікання з сусідніх шахт або до них через з’єднувальні виробки

$$\left. \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{\Gamma} = q_{\Gamma}(x, y, z, t); \quad (3)$$

в) взаємозв’язок між підземними та поверхневими водами (наприклад, річкою)

$$\left. \frac{\partial H}{\partial n} \right|_{\Gamma} = \frac{H - H_{\Gamma}}{\Phi}, \quad (4)$$

де Φ – фільтраційний опір, наприклад, донних відкладів, 1/м.

Зони зміни проникності внаслідок наявності виробок відтворюються змінними коефіцієнтами фільтрації K_{xx} , K_{yy} та K_{zz} .

Тривимірне рівняння переносу тепла в затопленому порушеному породному масиві описується рівнянням

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_w C_w v_x T \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - \rho_w C_w v_y T \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} - \rho_w C_w v_z T \right) + \\ & + q_{\Sigma} = (n \rho_w C_w + (1-n) \rho_{sk} C_{sk}) \frac{\partial T}{\partial t}, \end{aligned} \quad (5)$$

де T – температура води, °C; v_x, v_y, v_z – компоненти швидкості фільтрації, м/добу; n – пористість, б/р; ρ_w та ρ_{sk} – густина шахтної води та гірських порід, кг/м³; C_w та C_{sk} – теплоємність шахтної води та гірських порід, Дж/(кг·К); q_{Σ} – питома надходження (вилучення) тепла за рахунок джерел (стоків) тепла, наприклад, відбору тепла водовідливом, скидання води у шахтний ствол чи інші виробки, Вт/м³; інші позначення аналогічні прийнятим раніше.

На межах області фільтрації (шахтного поля) ставляться умови сталості температури, яка за глибиною відповідає вертикальному розподілу, який визначено експериментально або розраховано.

$$T|_{\Gamma} = T_{\Gamma}(x, y, z). \quad (6)$$

Вертикальні виробки (ствол, свердловини) в масштабі шахтного поля відтворюються в моделі як точкові в плані джерела – свердловини. Надходження тепла через кілька таких свердловин з координатами (x_i, y_i) , дебітами Q_i , та різницею температури відносно фонові температури в породному масиві ΔT_i протягом періоду часу $(0, t]$ визначається за співвідношенням

$$\int_0^t q_i d\tau = C_w \rho_w \int_0^t Q_i(\tau) \Delta T_i(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Аналогічно визначається кількість тепла, яке відбирається свердловиною, що відбирає воду.

В момент часу, що приймається за початковий (початок експлуатації геотермальної системи або циркуляції теплоносія), в області фільтрації задаються напір і температура підземних та пов'язаних з ними шахтних вод. При цьому розподіл початкової температури на однаковій глибині за умови подібності літологічних різниць за висотою може бути прийнятий однорідним

$$T(x, y, z, 0) = T_r(z), \quad (8)$$

де T_r – розподіл температури гірських порід за глибиною z , °C.

Для верифікації математичної моделі теплоперенесення однією з важливих характеристик є баланс тепла в зоні впливу геотермальної системи на шахтному полі. За період часу $[0, t]$ він визначається на основі рівності теплових потоків від внутрішніх джерел (стоків), втрат тепла через верхню межу області, геотермального потоку з глибини.

Відповідно до методу скінченних різниць [9], диференційні рівняння (1) та (5) замінюється різницевиими, які визначаються на множині дискретних точок у просторі та часі, а часткові похідні замінюються членами, обчисленими з різниці значень напору у цих точках. Процес призводить до системи алгебраїчних різницевих рівнянь; їх рішення дає значення напору в певні моменти і час.

Скінченнорізницева апроксимація межових умов для рівнянь фільтрації та теплоперенесення виконується за рекомендаціями [9]. Для контролю похибки чисельного рішення розмір блоків в зонах активної циркуляції води та теплообміну рекомендується зменшувати.

Розглянемо далі застосування чисельної моделі фільтрації та теплоперенесення на прикладі потенційної ділянки для розміщення геотермальної системи на полі закритої шахти № 2 «Новгородівська» з використанням фактичних даних [10]. Обчислювальна реалізація математичної моделі виконана за допомогою програми ModFlow 2009 (Schlumberger W.S., Канада), призначеної для скінченнорізницевого рішення рівнянь фільтрації і перенесення у водонасичених породах. Чисельна модель відтворює вплив нестаціонарних джерел і стоків води й тепла (водовідлив та скид термічно відпрацьованих вод), описує перехідні режими теплоперенесення зі змінною температурою води при закачуванні і відборі, неоднорідною структурою стосовно фільтраційних та ємнісних параметрів. Отримати відповідне аналітичне рішення такої задачі теплоперенесення не представляється можливим.

Створена модель відображає область фільтрації та теплоперенесення з двома промисловими пластами, менш проникний шар між ними, а також покрівлю пласта l_1 і підшову пласта k_8 . Особливості геологічної будови даної ділянки були описані у [10]. Модель включає п'ять шарів з кутами падіння, які відповідають їх природному заляганню, область фільтрації має площу до 20 км^2 ($4000 \times 5000 \text{ м}$) і вкрита блоками сітки розміром $100 \times 100 \text{ м}$. Потужності продуктивних товщ на моделі приймалися відповідно до залежності проникності підробленого породного масиву від кратності його підробки, і в середньому дорівнюють 10 – 40 потужностям вугільного пласта.

Для завдання зовнішніх меж області фільтрації та теплоперенесення використовувалися рекомендації [5], згідно яких тектонічне порушення (Новгородівський скид на півночі шахтного поля) є екраном на шляху руху підземних вод, тобто непроникної в гідродинамічному відношенні межі на ділянці скиду – співвідношення (3) при $q_T = 0$. На південному заході і південному сході, де вугільні пласти мають безпосередній гідравлічний зв'язок з обводненими палеоген-неогеновими відкладами, задано граничні умови третього роду (4), які відображають взаємозв'язок величини витрати потоку підземних вод палеоген-неогенового горизонту в продуктивну товщу з різницею гідродинамічних напорів в них. При цьому опір, якій обумовлює взаємозв'язок витрат і різниці напорів на виходах вугільних пластів, визначається за сумарною величиною провідності пластів і палеоген-неогенових відкладів, перерахованої відповідно до розмірів розрахункових блоків. У місцях перетоків підземних вод між шахтами ім. Д.С. Коротченка – № 2 «Новгородівська» і № 2 «Новгородівська» – № 1-3 «Новгородівська» задавалися граничні умови другого роду з витратами, які відповідають їхньому питомому значенню (табл. 1).

Внутрішніми межами моделі течії підземних та шахтних вод на полі шахти № 2 «Новгородівська» є очисні і підготовчі виробки, які відображаються граничними умовами першого роду з величиною гідродинамічного напору, що дорівнює абсолютній відмітці підшови вугільних пластів. Положення цих меж визначалося шляхом побудови плану гірничих виробок і перенесенням

контурів виїмкових ділянок на шари моделі. При моделюванні періоду після відключення водовідливу внутрішні граничні умови не задавалися.

Таблиця 1. Розподіл значень питомих перетоків в зонах бар'єрних ціликів між шахтами

Абс. відм. інтервалу глибин, м	Питомий перетік	
	«ім. Коротченко» – № 2 «Новгородівська»	№ 2 «Новгородівська» – № 1-3 «Новгородівська»
–300...–250	0,36	0,16
–250...–200	4,20	0,12
–200...–150	0,40	0,21
–150...–100	0,36	0,02
–100...–50	0,36	0,10
–50...0	0,26	0,15
0...+50	0,58	0,24

Розподіл температури шахтних вод перед початком експлуатації геотермальної системи задавався відповідно до геотермічного градієнту; на зовнішній межі області фільтрації – шахтного поля, яка знаходиться на значному віддаленні від самої геотермальної системи, задається нульовий тепловий потік. На шахтному стволі – внутрішній межі задається умова другого роду з відомою витратою води та температурою, яка розраховується при моделюванні.

Об'єм пустот в межах шахтного поля представлявся у вигляді суми трицино-порового й виробленого простору. Його зміна на моделі задавалася пошарово на основі планів гірничих робіт в кожному горизонті відпрацювання відомою потужністю. Відповідно до прийнятої розрахункової схеми, шахтний ствол являв собою досконалу свердловину, в яку рухається потік вод з водоносних горизонтів, що змінюється у часі. При схематизації фільтраційних властивостей масиву гірських порід, згідно з результатами [10], значення коефіцієнта фільтрації вугільних пісковиків для інтервалу 0 – 200 м приймалося в діапазоні 0,1 – 0,3 м/добу, а для інтервалу від 200 м до 500 м – 0,01 – 0,05 м/добу.

Виходячи з існуючих теоретичних уявлень [11] щодо гідравлічної проникності відпрацьованого породного масиву, величина пористості і коефіцієнта фільтрації в межах модельованих гірничих виробок задавалася збільшеною в середньому в 7 – 10 разів порівняно із зонами поза межами ведення гірничих робіт. Інфільтрація у верхньому шарі моделі задавалася за величиною 25% від середньорічної кількості атмосферних опадів в регіоні. Зони підвищеної інфільтрації (відстійники шахтних вод, ерозійні розчленування рельєфу) моделювалися нерівномірним за площею інфільтраційним живленням.

Ємнісні властивості товщі порід, що залягають вище верхньої межі ведення гірничих робіт (+120 м), визначалися пружноємністю водоносного горизонту кори вивітрювання карбону (10^{-3}) і гравітаційної водовіддачею палеоген-неогенових пісків (0,1). Середня величина ефективної пористості в інтервалі +120...+155 м (базис розвантаження підземних вод в долині р. Солоні) приймалася рівною 0,2.

Кінематична в'язкість води в діапазоні температур 18 – 25°C, очікуваному при експлуатації геотермальної системи на шахті № 2 «Новгородівська», змінюється від $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $0,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с, що несуттєво впливає на коефіцієнт фільтрації. При цьому слід враховувати, що зміни температури підземних вод характерні для обмежених за площею ділянок. Тому, в першому наближенні допустимо приймати усереднений коефіцієнт фільтрації, який визначається при середньозваженій температурі пласта і підземних вод в зоні активного водо- і теплообміну.

Для обґрунтування параметрів геотермальної системи та, зокрема, початкових умов моделі теплоперенесення, необхідно оцінити існуючий тепловий потенціал шахти № 2 «Новгородівська». В першому наближенні можна прийняти, що гідродинамічні параметри породного масиву не залежать від процесів теплоперенесення [12], а температура води і температура скелета порід співпадають, тобто теплообмін відбувається майже миттєво. Вважається, що в межах шахтного поля рух шахтних вод здійснюється по зонам завалення й затопленим виробкам, при цьому вісь z спрямована вниз.

Стаціонарний розподіл температури гірських порід та підземних і шахтних вод в зоні активного водообміну можна визначити з диференціального рівняння теплопровідності за вертикальною координатою z , яке з урахуванням конвекції має вигляд:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{v_z}{a} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

за таких межових умов:

$$T = T_1 \text{ при } z = H_1; \quad (10)$$

$$q_\Gamma = \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \text{ при } z = H_2. \quad (11)$$

Тут T_1 , H_1 – температура і глибина нейтрального шару, °С та м; z – глибина залягання, м; a та λ – температуропровідність та теплопровідність водонасичених порід, м²/с та Вт/м·°С; v_z – вертикальна швидкість фільтрації, м/с; q_Γ – геотермальний потік, Вт/м².

Рішення рівняння (9) за умов (10), (11) має вигляд [12]

$$T = T_1 + \frac{q_\Gamma}{\lambda B} \left[e^{B(z-H_2)} - e^{B(H_1-H_2)} \right], \quad B = \frac{v_z}{a}. \quad (12)$$

Кількість тепла в шахтних водах, що містяться в затоплених виробках, відносно температури T_{min} , до якої воду можна охолодити в теплових насосах, визначається з виразу:

$$q = C_w \rho_w (T - T_{\min}) V_w, \quad (13)$$

де q – кількість тепла, Дж; C_w, ρ_w – питома теплоємність та щільність шахтних вод, Дж/кг·°C та кг/м³; T – температура шахтних вод, °C; V_w – об’єм шахтних вод, м³.

Формула (13) застосовується інтегрально для виробок, розташованих на різних глибинах з урахуванням їх об’єму та температури води.

Розрахована за формулами (9) – (13) температура (рис. 1) добре узгоджується з даними виробничого геологорозвідувального підприємства «Артемівська гідрогеологічна партія», отриманими в ході вимірів температури на різних горизонтах. Отже, цей розрахований вертикальний розподіл температури може бути прийнятий як початкова умова при моделюванні теплоперенесення. Кількість теплової енергії, акумульованої в шахтних водах оцінюється в 1300 ТДж.

3. РЕЗУЛЬТАТИ

Розроблена тривимірна чисельна модель теплоперенесення була застосована для прогнозного розрахунку гідродинамічного режиму та температури шахтних і підземних вод та гірських порід як основних базових показників термодинамічного стану відпрацьованого породного масиву на закритій шахті № 2 «Новгородівська», де доцільно встановлення геотермальної системи відкритого типу. Розрахунок цих параметрів дозволить визначити енергетичну ефективність геотермальної системи у різних технологічних режимах в умовах даної шахти.

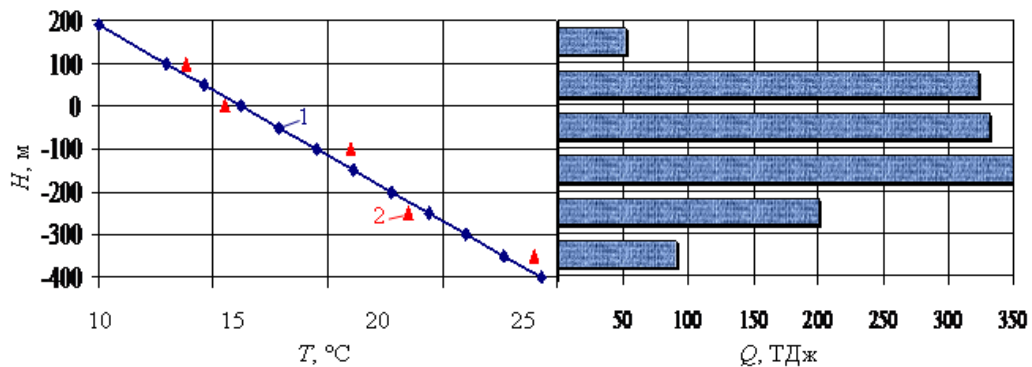


Рисунок 1. Зміна температури і кількості теплоти шахтної води в затопленому масиві шахти № 2 «Новгородівська»: 1 – розрахунок, 2 – фактичні дані

Параметри моделі були задані на основі зворотного моделювання, виконаного раніше для періоду затоплення шахти у [13] і уточнені з виділенням шарів з різними параметрами (табл. 2). При цьому властивості порід в шарах 5 та 7 за межами ведення гірничих робіт схематизувалися подібно до непорушених порід у шарах 4 та 6.

Таблиця 2. Апроксимація температури в розрахункових шарах чисельної моделі шахти № 2 «Новгородівська»

№ шару	Літологічний тип порід	Діапазон абс. відм., м	Середня температура порід, °С
1	Водоносний горизонт четвертинних еолово-делювіальних супісків і суглинків	+190...+205	10,1
2	Водотрив пліоцен-нижньочетвертинних червоно-бурих глин	+185...+190	10,3
3	Водоносний горизонт палеоген-неогенових пісків	+145 – +185	11,1
4	Непорушений водоносний комплекс середньокам'яновугільних відкладів, приурочений до піщаників	–20 – +145	13,9
5	Водоносний комплекс середньокам'яновугільних відкладів, порушений веденням гірничих робіт по пласту l_1	–60 – –20	17,1
6	Непорушений водоносний комплекс середньокам'яновугільних відкладів приурочений до піщаників	-220 – -60	20,0
7	Водоносний комплекс середньокам'яновугільних відкладів порушений веденням гірничих робіт по пласту k_8	-260 – -220	23,2
8	Непорушений водоносний комплекс середньокам'яновугільних відкладів приурочений до піщаників	-270 – -260	24,1

Пористість порушених порід у зонах ведення гірничих робіт задавалася шляхом додавання частки виробленого простору до об'єму цих зон, що фактично збільшило даний параметр у кілька разів порівняно з непорушеними породами. Проникність задавалася в діапазоні вирішення зворотних задач, а гідравлічний зв'язок між виробками на різних шарах через шахтний ствол задавався підвищеною проникністю розділяючих шарів у блоках скінченнорізницевої дискретизації, в яких розташовано шахтний ствол з урахуванням їх площі відносно площі горизонтальної проекції блоків. Розподіл зон з різним коефіцієнтом фільтрації для двох шарів, які містять затоплені зони ведення гірничих робіт, а також відповідні значення пористості представлено на рис. 2. Середня температура в шарах задавалася відповідно до глибини та геотермального градієнта на шахті. Параметри теплообміну враховувалися згідно коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності гірських порід та води. Для оцінки впливу інфільтрації на тривалий період цей параметр в моделі варіювався в діапазоні, характерному для метеорологічних умов даного регіону (35 – 45 мм/рік), це дало можливість більш достовірно, з урахуванням невизначеності даних щодо інфільтрації протягом тривалого періоду, визначити

діапазон зміни температури шахтних вод, що будуть відбиратися геотермальним модулем протягом періоду її експлуатації.

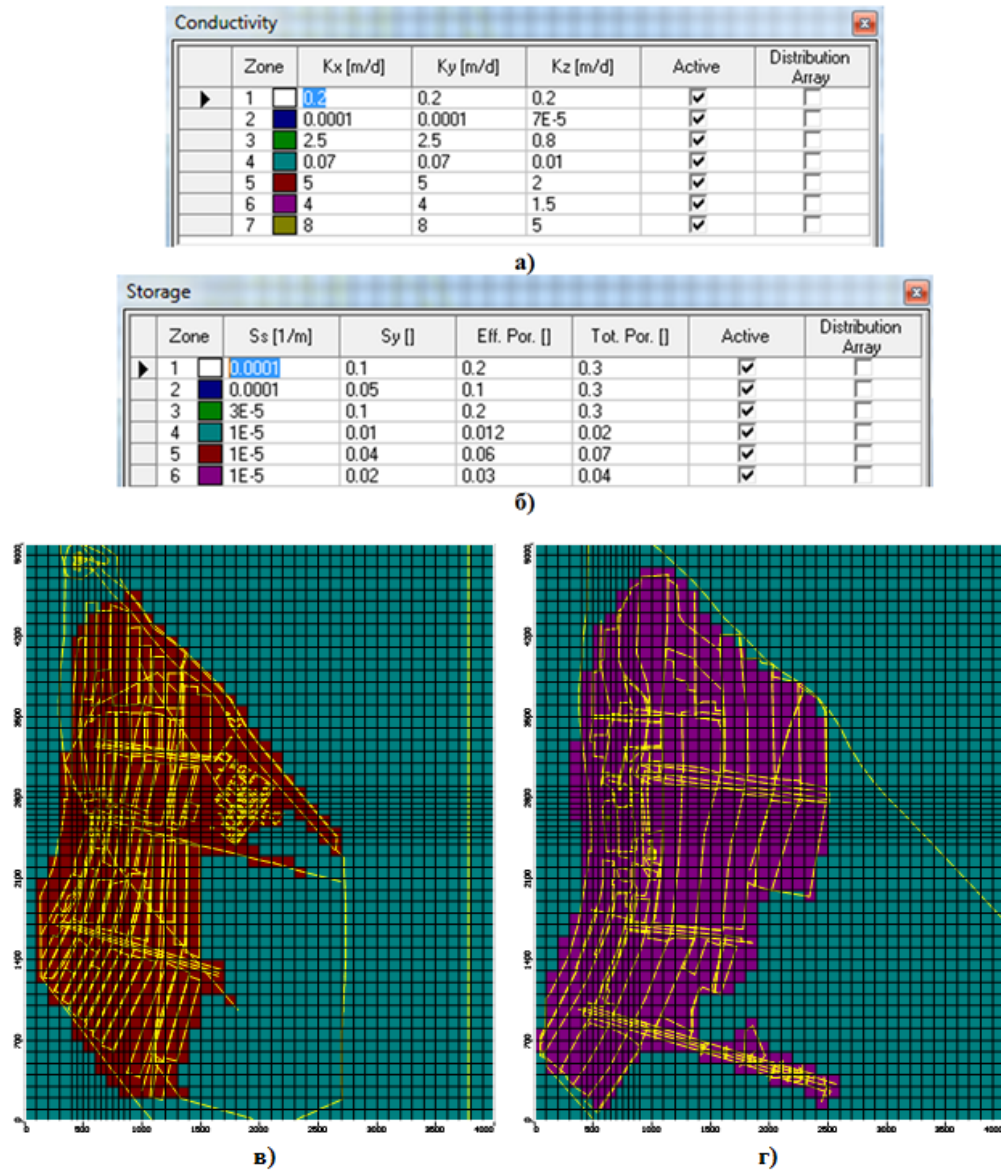


Рисунок 2 – Представлення неоднорідності відпрацьованого породного масиву шахти № 2 «Новгородівська» з геотермальною системою відкритого типу: а) скріншот значень коефіцієнту фільтрації, б) скріншот значень параметрів ємності; в) розподіл коефіцієнту фільтрації у зоні виробок пласта I₁, г) розподіл коефіцієнту фільтрації у зоні виробок пласта k₈

Надходження тепла з глибини моделювалося граничною умовою першого роду (сталю температурою порід та підземних вод, що контактують з ними) у гідравлічно слабопроникному шарі під нижньою затопленою зоною ведення гірничих робіт, відповідно до глибини та місцевого геотермального градієнта.

Міграція солей при функціонуванні геотермальної системи не моделювалася через незначний градієнт солоності з глибиною та в цілому невисокий вміст солей у шахтних водах на даному об'єкті.

Чисельне моделювання течії води та перенесення тепла проводилося для періоду експлуатації тривалістю 25 років, яке можна розпочинати при наближенні рівня шахтних вод до позначки +185 м, вище якої підйом води може призвести до засолення верхнього водоносного горизонту та підтоплення територій.

В результаті моделювання були визначені такі показники:

- рівень шахтних та пов'язаних з ним підземних вод і водний баланс у всіх водоносних шарах у вигляді карт;
- неоднорідний розподіл температури води і гірських порід у вигляді карт, який розраховувався за припущення про умовно миттєве вирівнювання температури при теплообміні між рідкою та твердою фазами в елементарному об'єму;
- часові ряди рівня води та температури у контрольних точках, розташованих насамперед у проникних шарах біля шахтного ствола, з якого відбирається вода;
- показники теплової потужності геотермального модуля у різні моменти часу в умовах гідравлічного зв'язку між водоносними горизонтами.

Оскільки чисельний алгоритм розрахунку фільтрації у використаній програмі Modflow не включає визначення параметрів течії у шахтному стволі, куди припливає вода з різних горизонтів, температуру води, що відбирається і подається наверх для термічного використання та з метою дренажу, розраховувалася за формулою змішування.

Для підтримання рівня води витрата відбору з шахтного ствола корегувалася відповідно до значень інфільтрації w з урахуванням оцінок, отриманих у розділі 3.3: 1950 м³/добу для $w = 35$ мм/рік, та 2500 м³/добу для $w = 45$ мм/рік. За прийнятим сценарієм моделювання, функціонування геотермальної системи, тобто водовідбір з подальшим термічним використанням шахтної води починається при наближенні рівня води до рівня +185 м у горизонті палеоген-неогенових пісків (шар 3 у табл. 2). Розрахунки виконано на період функціонування системи 25 років, який приймається для геотехнічних систем, наприклад, водозаборів при оцінюванні запасів підземних вод [14].

Збіжність чисельної моделі стосовно водного балансу досить висока: у всіх розрахункових шарах моделі (табл. 2) різниця між складовими припливу води та її витрати не перевищує 0,1%, що є достатнім для практичних цілей, зважаючи на варіацію фільтраційних та ємнісних параметрів у розрахункових шарах до 3 порядків. Таким чином, запропонована модель шахти № 2 «Новогродівська» з достатньою детальністю враховує особливості геологічної будови і відтворює зміни гідродинамічного режиму як відповідні реакції на техногенне втручання.

Результати моделювання наведені на рис. 3 – 6 і у табл. 3 – 5.

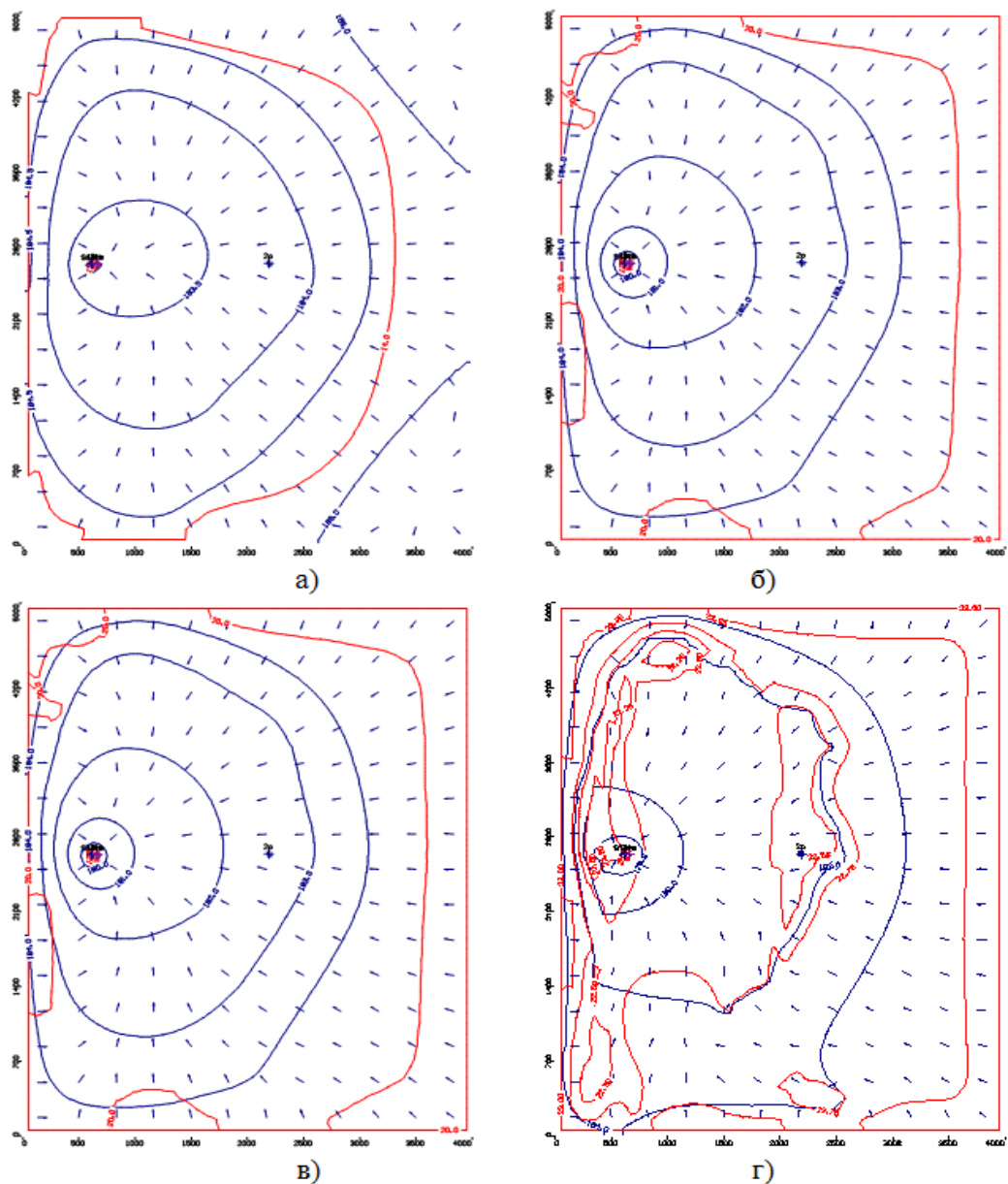


Рисунок 3. Прогнозний рівень шахтних та підземних вод та температура на момент 5 років з початку експлуатації: а) у шарі 4, б) у шарі 5, в) у шарі 6, г) у шарі 7 (див. табл. 2). Сині лінії – п'єзометричний напір, м, червоні лінії – температура, °С. Інфільтрація 35 мм/рік

4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Завдяки дренаючому ефекту водовідбору з шахтного ствола у всіх водоносних шарах формується зона пониження зі значеннями напору нижче позначки +185 м (рис. 3, 4), за виключенням певного перевищення цього рівня у частині горизонту палеоген-неогенових пісків над вуглевмісними породами (рис. 5). Але навіть там максимальний рівень не перевищує позначку +187 м, тобто не досягає підшови верхнього водоносного горизонту (+190 м) і стабілізується з часом (рис. 6). Завдяки цьому можна попереджувати подальший

підйом рівня води, потрапляння більш мінералізованої шахтної води до верхнього горизонту (розрахункового шару 1), тобто досягти екологічно прийняттого режиму функціонування геотермальної системи з підтримкою безпечного рівня води і ізоляцією шахтних вод від джерел водопостачання для населення.

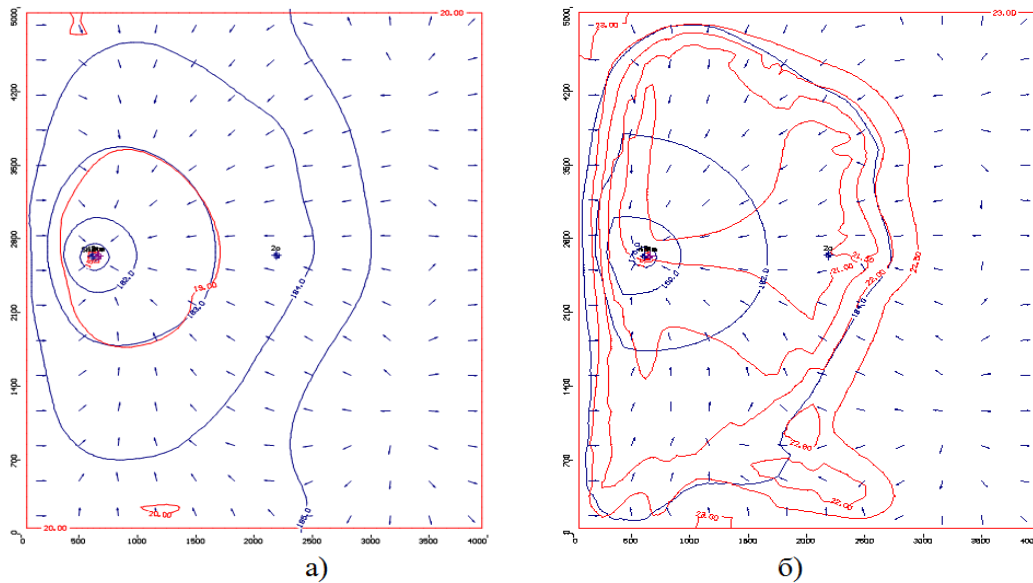


Рисунок 4. Прогнозний рівень шахтних та підземних вод та температура на кінець періоду експлуатації (25 років): а) у шарі 6, б) у шарі 7 (див. табл. 2). Сині лінії – п'езометричний напір, м, червоні лінії – температура, °С. Інфільтрація 35 мм/рік

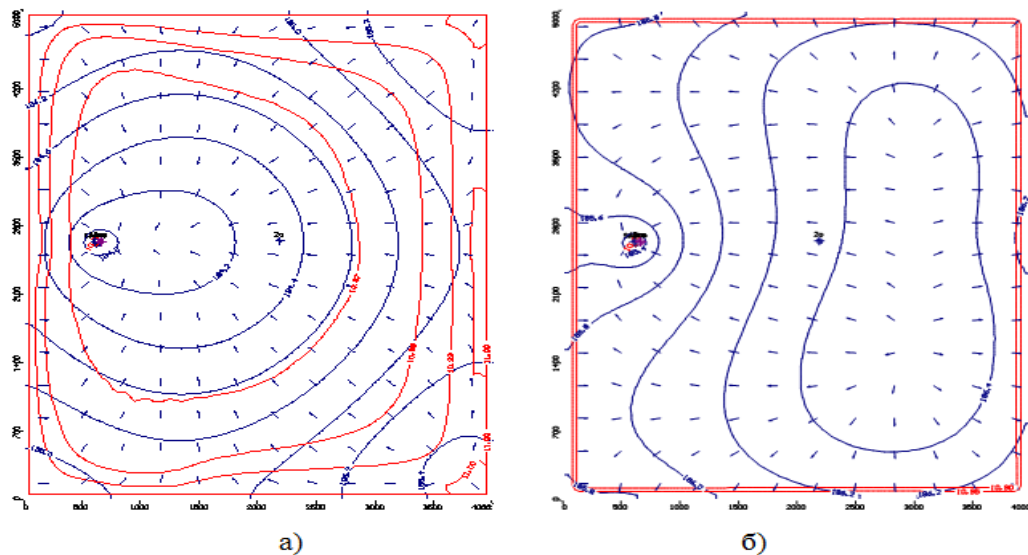


Рисунок 5. Прогнозний рівень підземних вод та температура у горизонті палеоген-неогенових пісків (шар 3, табл. 2): а) через 5 років з початку експлуатації, б) на кінець періоду експлуатації (25 років). Інфільтрація 35 мм/рік

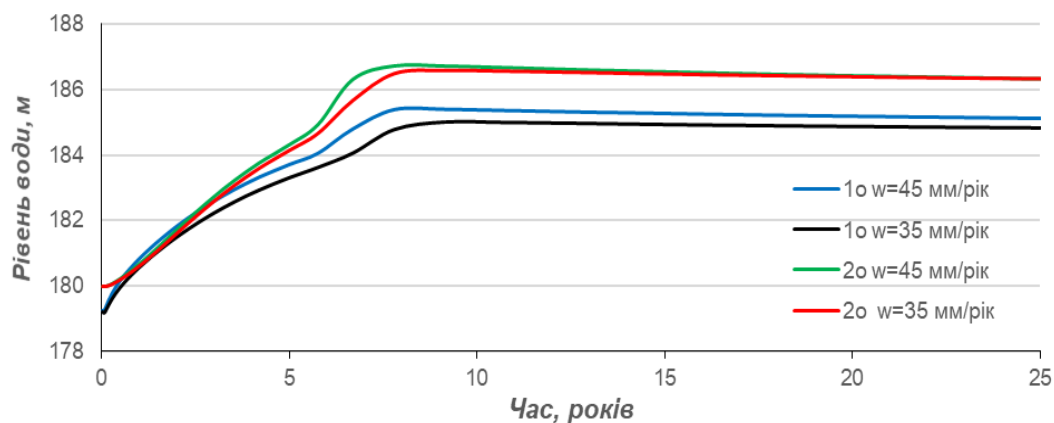


Рисунок 6. Рівень води у контрольних точках на території шахтного поля протягом періоду експлуатації геотермальної системи за різних значень інфільтрації w : 1) в точці «1о» біля шахтного ствола, 2) на межі шахтного поля у напрямку м. Новгородівка (точка «2о» на рис. 3 – 5)

Таблиця 3. Прогнозні припливи Q до шахтного ствола з проникних шарів та температура води T при інфільтрації 35 мм/рік

Номер шару*, з якого припливає вода або шахтний ствол	Момент часу $t = 1$ рік		Момент часу $t = 5$ років		Момент часу $t = 25$ років	
	Q , м ³ /добу	T , °C	Q , м ³ /добу	T , °C	Q , м ³ /добу	T , °C
3	166,2	10,99	200,1	10,97	217,8	10,86
5	314,4	16,97	297,2	16,85	287,7	15,91
7	1469,4	22,84	1452,7	22,46	1444,5	20,94
Шахтний ствол	1950	20,88	1950	20,43	1950	19,07

* див. табл. 2.

Таблиця 4. Прогнозні припливи Q до шахтного ствола з проникних шарів та температура води T при інфільтрації 45 мм/рік

Номер шару*, з якого припливає вода або шахтний ствол	Момент часу $t = 1$ рік		Момент часу $t = 5$ років		Момент часу $t = 25$ років	
	Q , м ³ /добу	T , °C	Q , м ³ /добу	T , °C	Q , м ³ /добу	T , °C
3	223,3	10,99	255,4	10,97	474,9	10,84
5	397,6	16,96	381,7	16,79	371,4	15,65
7	1879,1	22,80	1862,9	22,34	1653,7	20,55
Шахтний ствол	2500	20,82	2500	20,33	2500	17,98

* див. табл. 2.

Таблиця 5. Прогнозна максимальна теплова потужність геотермальної системи, кВт, для різних моментів часу протягом періоду її експлуатації

Інфільтрація, мм/рік	Момент часу $t = 1$ рік	Момент часу $t = 5$ років	Момент часу $t = 25$ років
35	1393,8	1351,1	1224,6
45	1779,1	1720,9	1438,6

При цьому значення гідравлічного градієнту у зоні виробок (рис. 4, б) у розрахункових шарах 5 та 7 (табл. 2) суттєво менші, а зона дренування охоплює значну площу за рахунок більшої проникності порід. Наявність зони пониженого напору в затопленій шахті дозволяє контролювати рівень води у верхніх водоносних шарах. Рівень води біля шахтного ствола буде знаходитися біля позначки +185 м. За межами зон з підземними виробками (шахтного поля) можливе формування зони з перевищенням рівнем води позначки +185 м (рис. 5, б), але максимальний рівень води не досягне підосви верхнього водоносного горизонту +190 м. Вплив збільшення багаторічної інфільтрації w на рівневий режим у надвугільному горизонті (шарі 3) в діапазоні 35 – 45 мм/рік не є суттєвим: зміна рівня води при зміні w у цьому інтервалі не перевищить 0,7 м, у середньому протягом 25 років становитиме 0,13 м біля шахтного ствола та 0,31 м у контрольній точці «2о» на межі шахтного поля.

Горизонтальні припливи до шахтного ствола зі слабопроникних розрахункових шарів 4 та 6 практично несуттєві, з них відбувається переважно вертикальне перетікання до нижніх шарів 5 та 7. Тому приплив до шахтного ствола розраховувався як сума припливів з двох проникних шарів 5 та 7, що містять виробки, та шару 3, що відповідає горизонту палеоген-неогенових пісків (табл. 3, 4).

За розрахунками очікується певне зниження температури шахтних та підземних вод на різних глибинах протягом періоду експлуатації геотермальної системи за рахунок заміщення відкачуваних теплих вод більш холодними, що припливають зверху з інфільтраційним живленням. Збільшення припливу зверху, яке моделюється збільшенням значень багаторічної інфільтрації від 35 мм/рік до 45 мм/рік сприяє більш швидкому заміщенню теплих вод холодними (табл. 3, 4): температура у контрольних точках біля шахтного ствола у нижньому проникному горизонті відпрацювання (шарі 7 моделі) знизиться на 2,06°C та 2,45°C, а у верхньому проникному горизонті відпрацювання (шарі 5 моделі) – на 1,1°C та 1,34°C відповідно. Розрахований температурний діапазон добре корелює з температурою 16 – 17°C води, що термічно використовується на шахті «Благодатна» в подібних геолого-гідрогеологічних умовах [15], що свідчить про відповідність результатів моделювання умовам реального об'єкта.

Більш активне заміщення теплих шахтних вод холоднішими водами зверху може вплинути на зменшення теплової потужності геотермальної системи q_{GTS} (табл. 5). При величині відбору $Q = 1950$ м³/добу, що відповідає меншій інфільтрації ($w = 35$ мм/рік) q_{GTS} зменшиться на 3% відносно показника на 1 рік з початку експлуатації через 4 роки і на 9% – на кінець періоду експлуата-

ції. При величині відбору $Q = 2500 \text{ м}^3/\text{добу}$, що відповідає більшій інфільтрації ($w = 45 \text{ мм/рік}$) зменшення q_{GTS} становитиме 3% та 16% відповідно. Більші темпи охолодження при $w = 45 \text{ мм/рік}$ пов'язані зі зростанням з часом у водному балансі частки холоднішої води, що припливає зверху з шару 3.

Зауважимо, що кількість тепла, яке надходить з глибинним геотермальним потоком в затоплені виробки, які займають фактично площу до 10 км^2 при середній густині теплового потоку $0,05 \text{ Вт/м}^2$, можна оцінити у $0,5 \text{ МВт}$, що в 2-3 рази менше кількості тепла, що відбирається з теплою водою (табл. 5). Цей дисбаланс тепла узгоджується з результатами моделювання щодо поступового охолодження води та зниження теплової потужності. При цьому йдеться про максимально можливу теплову потужність геотермальної системи, тому її зменшення на 10-15% протягом досить тривалого періоду не є критичним для сталого теплозабезпечення. Загальмувати охолодження можливо шляхом відбору шахтних вод з різної глибини, які матимуть різну температуру. Це потребує деталізації фільтраційної схеми геотермальної системи (положення точок відбору води, виробок, схем циркуляції, фільтраційних, ємнісних, та теплофізичних параметрів тощо), що планується зробити на наступному етапі виконання проекту.

Таким чином, розроблена чисельна тривимірна модель з достатньою деталісттю відтворює просторову неоднорідність фільтраційних та ємнісних параметрів відпрацьованого масиву в зоні можливого розміщення геотермальної системи відкритого типу для умов шахти № 2 «Новгородівська». За результатами моделювання визначено діапазон температури придатних для термічного використання шахтних вод, що відбираються водовідливом, який підтримає безпечний рівень води з попередженням підтоплення та засолення верхнього водоносного горизонту. Встановлено, що заміщення теплих шахтних вод більш холодними водами зверху призведе до поступового зниження температури на $1,75 - 2,84^\circ\text{C}$ залежно від глибини відбору та величини інфільтраційного живлення. Відповідне зменшення максимальної теплової потужності до 3% протягом перших 5 років експлуатації геотермальної системи та до 9 – 16% протягом періоду експлуатації формується за рахунок переважання кількості тепла, що відбирається, над припливом геотермального тепла, але не є критичним для експлуатації геотермальної системи.

5. ВИСНОВКИ

Для оцінки показників роботи геотермальної системи відкритого типу розроблена математична модель, заснована на чисельному моделюванні течії підземних і шахтних вод та переносу тепла у порушеному масиві у зоні впливу системи. Такий підхід є доцільним для детального кількісного аналізу та прогнозу термодинамічного стану породного масиву за різних технологічних та природних умов.

Розроблена чисельна тривимірна модель теплоперенесення, яка з достатньою деталісттю відтворює просторову неоднорідність породного масиву та течії підземних вод і температурних полів навколо геотермальної системи, була протестована для умов шахти № 2 «Новгородівська». Оцінений діапазон температури шахтних вод, що відбираються водовідливом з підтриманням

безпечного рівня води для попередження підтоплення й засолення верхнього водоносного горизонту, становить 18 – 21°C, що в цілому узгоджується з показниками геотермальної системи на шахті «Благодатна» на території Західного Донбасу. Заміщення теплих шахтних вод більш холодними водами інфільтраційного живлення, за даними моделювання, призведе до поступового зниження температури на 1,7 – 2,8°C, а відповідне зменшення максимальної теплової потужності становитиме до 3% протягом перших 5 років експлуатації та до 9 – 16% протягом усього періоду експлуатації системи. Це відбувається внаслідок переважання кількості теплової енергії, яка відбирається, над припливом геотермального тепла з глибини земних надр.

За результатами проведених розрахунків в гірничо-геологічних умовах закритих шахт Донбасу показано, що розроблена математична модель тепловитнесення у геотермальних системах відкритого типу з використанням тепла шахтних вод дозволяє обґрунтовано визначати параметри енергоефективності відбору тепла, оцінювати зміни теплового стану породного масиву і шахтних вод за різних умов експлуатації систем, а також встановлювати безпечні діапазони рівня шахтних вод, що забезпечать захист прилеглих територій від підтоплення і достатню ізоляцію мінералізованих вод від джерел водопостачання для населення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалко М.П., Денисюк С.П. (2005). Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. К.: УЕЗ, 506 с.
2. Inkin, O., Rudakov, D. (2019). An assessment of technical and economic feasibility to install geothermal well systems across Ukraine. *Geotherm Energy* 7:17. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0134-7>
3. Bao, T., Liu, Z. (2019). Geothermal Energy from Flooded Mines: Modeling of Transient Energy Recovery with Thermohaline Stratification. *Energy Conversion and Management* 199, 111956 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111956>
4. 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>
5. Рудаков Д.В., Садовенко І.О. (2006). Прогнозування гідродинамічного режиму при відпрацьовуванні й затопленні шахтного поля. *Вісник ЖДТУ*, (1), 151-157.
6. Malolepszy, Z. (1998). Modelling of geothermal resources within abandoned coal mines, Upper Silesia, Poland. Report nr. 8. *The United Nations University, Reykjavik*, 217-238.
7. Diersch H.-J. (2014). FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 996 p. <https://doi.10.1007/978-3-642-38739-5>
8. 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>
9. Langevin Ch. D., Hughes J. D., Banta E. R., Niswonger R. G., Panday S., Provost A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Chapter 55 of Section A, Groundwater Book 6, Modeling Techniques. U.S.G.S., <https://doi.org/10.3133/tm6A55>

10. Краснопольский Н.А. (2006). Заключение о результатах работы «Прогноз изменения эколого-гидрогеологических условий в границах горных отводов шахты №2 «Новгородовская», которая ликвидируется, ликвидированной шахты «Селидовская» и шахты им. Д.С. Коротченко, которая подлежит ликвидации, а также смежных с ними действующих шахт: отчет о НИР. Артемовск : Артемовская гидрогеологическая партия, 130 с.
11. Садовенко И.А., Рудаков Д.В. (2010). Динамика фильтрационного массопереноса при ведении и свертывании горных работ. Д.: Нац. горный ун-т, 216 с.
12. Лялько В.И. (1974). Методы расчета тепло- и массопереноса в земной коре. Алгоритмы и программы. К.: Наукова думка, 131 с.
13. Садовенко І.О., Інкін О.В. (2016). Теоретичні та геотехнологічні основи розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ. *Mining of Mineral Deposits*, (Vol. 10), Issue 4, 1-10.
14. Костюченко М.М., Шабатин В.С. (2005). Гідрогеологія та інженерна геологія. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 144 с.
15. Пивняк Г.Г., Самуся В.И., Оксень Ю.И. (2017). Теория и практика теплонасоной утилизации теплоты шахтной воды. *Уголь Украины*, 6-10.

REFERENCES

1. Kovalko M.P., Denysjuk S.P. (2005). Energozberezhennja – priorytetnyj naprjamok derzhavnoi' polityky Ukraїny. К.: UEZ, 506 s.
2. Inkin, O., Rudakov, D. (2019). An assessment of technical and economic feasibility to install geothermal well systems across Ukraine. *Geotherm Energy* 7:17. <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0134-7>
3. Bao, T., Liu, Z. (2019). Geothermal Energy from Flooded Mines: Modeling of Transient Energy Recovery with Thermohaline Stratification. *Energy Conversion and Management* 199, 111956 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111956>
4. 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>
5. Rudakov D.V., Sadovenko I.O. (2006). Prognozuvannja gidrodinamichnogo rezhymu pry vidprac'ovu-vanni j zatoplenni shahtnogo polja. *Visnyk ZhDTU*, (1), 151-157.
6. Malolepszy, Z. (1998). Modelling of geothermal resources within abandoned coal mines, Upper Silesia, Poland. Report nr. 8. *The United Nations University, Reykjavik*, 217-238.
7. Diersch H.-J. (2014). FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 996 p. <https://doi.10.1007/978-3-642-38739-5>
8. 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>
9. Langevin Ch. D., Hughes J. D., Banta E. R., Niswonger R. G., Panday S., Provost A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Chapter 55 of Section A, Groundwater Book 6, Modeling Techniques. U.S.G.S., <https://doi.org/10.3133/tm6A55>
10. Krasnopol'skij N.A. (2006). Zakljuchenie o rezul'tatah raboty «Prognoz izmenenija jekologo-gidrogeologicheskijh uslovij v granicah gornyh otvodov shahty №2 «Novogrodovskaja», kotoraja lik-vidiruetsja, likvidirovannoj shahty «Selidovskaja» i shahty im. D.S. Korotchenko, kotoraja podle-zhit likvidacii, a takzhe smezhnyh s nimi

dejstvujushhij shaht: otchet o NIR. Artemovsk : Artemovs-kaja gidrogeologicheskaja partija, 130 s.

11. Sadovenko I.A., Rudakov D.V. (2010). Dinamika fil'tracionnogo massoperenosa pri vedenii i svertyvanii gornyh rabot. D.: Nac. gornij un-t, 216 s.

12. Ljal'ko V.I. (1974). Metody rascheta teplo- i massoperenosa v zemnoj kore. Algoritmy i programmy. K.: Naukova dumka, 131 s.

13. Sadovenko I.O., Inkin O.V. (2016). Teoretychni ta geotehnologichni osnovy rozrobky pryrodno-tehnogennyh resursiv vugil'nyh rodovyshh. Mining of Mineral Deposits, (Vol. 10), Issue 4, 1-10.

14. Kostjuchenko M.M., Shabatyn V.S. (2005). Hidrogeologija ta inzhenerna geologija. K.: Vydavnycho-poligrafichnij centr «Kyj'vs'kyj universytet», 144 s.

15. Pivnjak G.G., Samusja V.I., Oksen' Ju.I. (2017). Teorija i praktika teplonasosnoj utilizacii teploty shahtnoj vody. *Ugol' Ukrainy*, 6-10.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Метою даної роботи є розробка і верифікація чисельної моделі течії шахтних вод та переносу тепла у порушеному гірському масиві в зоні впливу геотермальної системи відкритого типу з прогнозом показників їх енергоефективності відповідно до існуючих геолого-гідрогеологічних умов та техногенної порушеності відпрацьованого масиву.

Методика базується на використанні скінченнорізницевою моделі тривимірною течії шахтних вод та теплоперенесення через неоднорідне пористе середовище. Обчислювальна реалізація моделі виконана за допомогою програми ModFlow, призначеної для рішення рівнянь фільтрації і перенесення у водонасичених породах.

Результати. Для умов шахти № 2 «Новгородівська» визначено діапазон температури шахтних вод, що пропонується відбирати за умови підтримання безпечного рівня води для попередження підтоплення й засолення верхнього водоносного горизонту протягом 25 років можливої експлуатації; оцінений діапазон 18 – 21°C в цілому узгоджується з показниками геотермальної системи на шахті «Благодатна» у Західному Донбасі. Показано, що очікується незначне охолодження шахтних вод внаслідок переважання відбору тепла над припливом геотермального тепла знизу за механізмом заміщення теплих шахтних вод більш холодними інфільтраційними водами.

Наукова новизна. Розроблена чисельна тривимірною модель теплоперенесення, яка відтворює просторову неоднорідність руху підземних вод і температурних полів навколо геотермальної системи в затопленій шахті та еволюцію температурного поля при різній інтенсивності інфільтраційного живлення.

Практична значимість. Запропонована модель теплоперенесення у геотермальних системах дозволяє визначати і оптимізувати параметри їх роботи за критеріями енергоефективності, оцінювати зміни теплового стану породного масиву і шахтних вод за різних умов експлуатації систем при підтримванні безпечного рівня шахтних вод.

Ключові слова: закрита шахта, геотермальні системи, шахтні води, фільтрація, теплоперенесення, моделювання

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.

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. Branch for Physics of Mining Processes in 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