

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ГЕОТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННИХ РЕСУРСІВ ВУГІЛЬНИХ РОДОВИЩ

I. Садовенко¹, О. Інкін^{1*}, А. Загриценко¹

¹Кафедра гідрогеології та інженерної геології, Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, Україна

*Відповідальний автор: e-mail inkin@ua.fm, тел. +380562470711, факс: +380562470711

THEORETICAL AND GEOTECHNOLOGICAL FUNDAMENTALS FOR THE DEVELOPMENT OF NATURAL AND MAN-MADE RESOURCES OF COAL DEPOSITS

I. Sadovenko¹, O. Inkin^{1*}, A. Zagrytsenko¹

¹Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail inkin@ua.fm, тел. +380562470711, факс: +380562470711

ABSTRACT

Purpose. Theoretical and technological substantiation of parameters and schemes related to formation and use of natural and man-made volumetric and thermal resources of abandoned coal deposits using complex of geo-modules providing their activation, selection and storage in keeping with uneven seasonal energy consumption.

Methods. Analytical and numerical methods for solving equations of hydrogas dynamics and heat- mass transfer; mathematical modeling by means of special software; statistical methods; stabilometrical testing of aqueous rocks samples by triaxial compression tool.

Findings. The system of models presenting gas-dynamic, filtration and heat processes occurring in disturbed rocks as a result of natural and man-made resources development while shutting down mining works has been developed. The studied patterns of water and gases movement in low-permeable coal-bearing rocks, reservoir beds and flooded mines allowed to evaluate the technological parameters of extraction, accumulation, and utilization of these heat transfer fluids for heating and cooling of buildings. The paper proposes and justifies technological options serving to utilize the thermal resource of water in a flooded mine and to activate this resource by underground combustion of residual coal reserves.

Originality. The mechanism of heat transfer in the flooded rock mass of the abandoned mine with periodic pumping and selection of mine waters from different horizons and their heating by natural geothermal heat and underground combustion of residual coal reserves has been studied.

Practical implications. The developed models have been implemented in real mines which allowed to evaluate the ranges of flow and heat transfer parameters related to the conditions for heat transfer fluid extraction and utilization at the final stage of mining. The developed models and obtained dependences allowed to justify the parameters of technological schemata aimed at the development of natural and man-made resources of coal deposits.

Keywords: coal deposits, disturbed rocks, hydraulic fracturing, aqueous gas storage, underground coal combustion, modeling, geo-modules

1. ВСТУП

Займаючи 0.45% загальносвітової поверхні суші, Україна за обсягами гірничодобувних робіт, які тривають понад 200 років і супроводжуються значним впливом на навколишнє середовище, входить до першої десятки країн світу. Для старих вугледобувних регіонів характерна суттєва техногенна перебудова геологічних структур і формування критичної екологічної ситуації (Perov & Makarov, 2010). З урахуванням дефіциту та несинхронності споживання енергоносіїв виникає також гостра необхідність у використанні природно-техногенних ресурсів зосереджених на відпрацьованих шахтних полях і ділянках (Войко, 2015). До цих ресурсів відносяться залишкові та не-

кондиційні запаси вугілля, підземні води, які знаходяться в затоплених гірничих виробках, і горючі гази слабопроникних вуглевмісних порід (Gazaliyev, Portnov, & Kamarov, 2015). Крім того, змінений у результаті гірничих робіт масив містить потужний емнісний ресурс, здатний акумулювати рідкі та газоподібні енергоносії в обсязі, достатньому для згладжування сезонних коливань їх споживання (Arens, 2001).

Основною причиною такої ситуації є успадкована неузгодженість різних стадій розвідки, розробки і згорання гірничих робіт на вугільних родовищах (Lustiuk, Diakon, & Petrina, 2013). У техніко-економічних і геологічних прогнозах ефективності відпрацювання шахтних полів недостатньо розгля-

даються передумови формування й обсяги супутніх корисних компонентів і колекторів, гідротермальний ресурс яких оцінюється як негативний на етапі розробки вугільних пластів, а на етапі завершення гірничих робіт взагалі не враховується (Logunov, 2011). Для визначення умов формування та потенціалу техногенних гідротермальних родовищ, технологічного обґрунтування комплексного освоєння енергоємнісного ресурсу вугленосних площ та ліквідованих гірничодобувних підприємств, здатних на сучасному рівні економічної ефективності задовольнити потреби ринку країни у тепловій енергії, необхідні відповідні кількісні оцінки. Тому поєднання етапів відпрацювання вугільних родовищ на єдиній теоретичній основі, з визначенням параметрів геотехнологічних модулів з використання природно-техногенного ресурсу енергії та смісних властивостей підробленого масиву і суміжних площ, є актуальною і стратегічно важливою науково-практичною проблемою.

2. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДОСЛІДЖЕНЬ І ОБґРУНТУВАНЬ З ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

Проведений детальний аналіз екологічного навантаження, динаміки споживання і дефіциту теплової енергії у вугледобувних регіонах України показує, що сучасна ситуація зумовлює необхідність пошуку альтернативних енергоносіїв, які мінімізують вплив на навколишнє середовище, та резервуарів, здатних синхронізувати сезонну нерівномірність їх споживання. Разом з тим, встановлено, що у сформованому в результаті тривалого ведення гірничих робіт природно-техногенному породному масиві зосереджена велика кількість герметичних колекторів (геологічні структури, гірничі виробки) і теплоносіїв, які умовно можна поділити за агрегатним станом на газоподібні (газ щільних вуглевмісних порід), рідкі (шахтні та підземні води) і тверді (некондиційні та забалансові запаси вугілля).

Вугільні родовища є основною паливно-енергетичною базою країни, які містять також значні ресурси вуглеводневого газу у слабопроникних породах. Україна посідає третє місце в Європі та тринадцяте у світі за ресурсами цього виду палива. Його кількість сягає 8 трлн м³, у той час як запаси традиційного газу не перевищують 1 трлн м³. У затопленому відпрацьованому масиві зосереджені потенційні запаси теплової енергії у вигляді накопиченої в шахтних водах геотермальної енергії й некондиційних та малопотужних вугільних пластів, залишених після відпрацювання шахтного поля. Кількість невикористаного вугілля може сягати 30–50% розвіданих запасів шахти, а температура підземних вод, які заповнюють її глибокі горизонти, 35°C. Крім того, відпрацьовані вугільні родовища містять потужний емісійний ресурс у проникних пластах-колекторах та затоплених гірничих виробках, здатних акумулювати значні об'єми теплоносіїв.

На основі аналізу наукових робіт (Krein, 2004) встановлено, що більшість способів розробки та зберігання природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ спрямовані на окремі види енергоносіїв, у той час як для економічно ефективного освоєння

вугленосних площ необхідне обґрунтування комплексної геотехнології, яка забезпечує видобуток енергоносіїв у єдиному технологічному циклі з їх сезонним накопиченням у природних колекторах. Це вимагає розробляти нові та вносити доповнення в існуючі геотехнологічні способи розробки рідких, газоподібних і твердих енергоносіїв, зосереджених у відпрацьованих та суміжних шахтних полях, встановлювати характеристики, які відображають кількісні взаємозв'язки між інтенсивністю видобутку енергоносіїв, динамікою їх споживання та зберігання у відповідності із зовнішньою температурою.

Напрямок технологічного удосконалення в освоєнні природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ автори зосередили на підвищенні коефіцієнту корисної дії існуючих геотехнологій, більш повному використанні теплових і емісійних ресурсів вуглевмісних порід, а також на узгодженні стадій та інтенсивності розробки енергоносіїв з необхідними обсягами їх споживання і зберігання.

2.1. Розробка й обґрунтування моделей акумуляції теплоносіїв у водоносних горизонтах і активізації газовиділення з слабопроникних колекторів

Математична модель переносу тепла при закачуванні та відборі теплоносіїв із водоносних порід заснована на двовимірних рівняннях фільтрації підземних вод і перенесення тепла в них за рахунок конвекції та кондукції (Rudakov, Sadovenko, & Inkin, 2012):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Km \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Km \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q_{\Sigma} - \frac{K_1}{m_1} (H_1 - H) - \frac{K_2}{m_2} (H - H_2) = S_s \frac{\partial H}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v_x m}{n} T \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda m}{C_w \rho_w n} \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{v_y m}{n} T \right) + \frac{mq_{\Sigma} - q_b - q_t}{C_w \rho_w n} = m R_T \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (2)$$

$$H_{\Gamma} = H_0; T_{\Gamma} = T_0; H(x, y, 0) = H_0; T(x, y, 0) = T_0. \quad (3)$$

Вони враховують витоки тепла через покрівлю і підшову акумулюючого пласта:

$$q_t = - \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=m}; \quad q_b = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (4)$$

де:

$$R_T = 1 + ((1-n)/n) \cdot (\rho_{sk} C_{sk}) / (\rho_w C_w);$$

K – коефіцієнт фільтрації;

m – потужність водоносного горизонту;

K_1 і m_1 , K_2 і m_2 – відповідно ті ж параметри його покрівлі та підшови;

H, H_1, H_2 – напір в акумулюючому горизонті, верхньому та нижньому водоносних пластах;

Q_{Σ} – змінна в часі та розподілена за площею сумарна інтенсивність відбору і нагнітання води свердловинами;

λ – коефіцієнт теплопровідності порід акумулюючого горизонту;

S_s – пружноємність пласта;
 ρ_w, ρ_{sk} – густина води і щільність скелета порід;
 C_w, C_{sk} – питома теплоємність води і скелета порід;
 T – температура води;
 q_t, q_b – теплові потоки з горизонту в його покрівлю та підшову;
 q_s – розподілена в обсязі пласта інтенсивність джерел і стоків тепла;
 n – пористість порід.

Обчислювальна реалізація моделі переносу тепла виконана за допомогою програми Modflow 2009, призначеної для скінченно-різницевого розв'язку рівнянь фільтрації та перенесення у водоносних горизонтах. Коректність моделі доведена на основі аналітичного рішення Лавреє для окремої свердловини. У розрахунках розглядалася наступна схема акумуляції та відбору теплової енергії: у водоносний пласт потужністю 20 м протягом 3 місяців через одну свердловину виконується закачування води з температурою 25°C і дебітом 300 м³/доб, потім, після паузи тієї ж тривалості, проводиться відкачка теплої води з свердловини з тим же дебітом. Початкова температура підземних вод приймалася рівною 12°C. Порівняння результатів показує узгодженість чисельної моделі з аналітичним рішенням, при цьому максимальні відхилення між профілями температури по відстані від свердловини, розрахованими двома методами, не перевищують 2°C (Рис. 1).

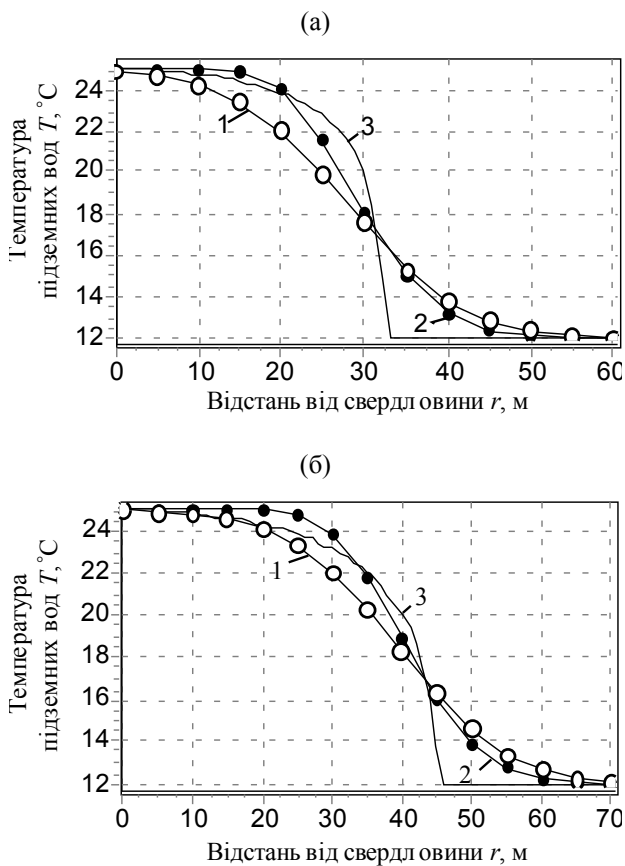


Рисунок 1. Розподіл температури підземних вод навколо нагнітальної свердловини в моменті часу (а) 90 діб і (б) 180 діб: 1 – чисельне рішення при значенні $\lambda = 1.73 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; 2 – чисельне рішення при 0.02λ ; 3 – аналітичне рішення

За допомогою розробленої моделі проведена попередня термогідродинамічна оцінка роботи геодинамічної системи, яка призначена для тепло- і холодопостачання будівель у кліматичних умовах Донбасу та складається з трьох “теплих” і “холодних” свердловин. Шляхом моделювання оцінено зміну температури і рівня підземних вод при їх відборі й нагнітанні з пласта колектора.

Аналіз отриманих результатів показав, що температура теплоносіїв у період простою системи практично не змінюється, однак у період відбору в “теплій” свердловині вона зменшується на 20% і до його закінчення знижується до 19°C. При цьому коефіцієнт акумуляції тепла в середньому склав 0.85, що перевищує закордонний промисловий досвід зберігання теплової енергії у водоносних породах (Рис. 2). Стрілками показані напрямки течії підземних вод.

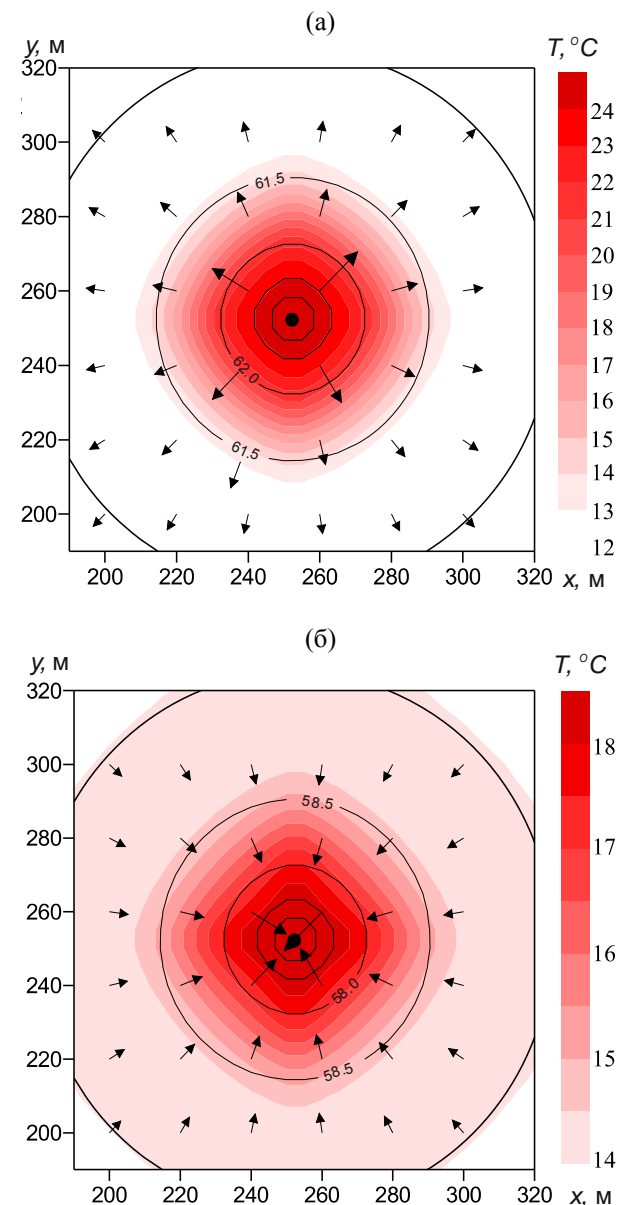


Рисунок 2. Розподіл рівня підземних вод (ізолінії абсолютних відміток) та їх температури T (відтинки) по площі ($x \times y$) водоносного горизонту: (а) на момент закінчення закачування; (б) після паузи та відкачування води

Співвідношення розрахованих параметрів показує, що система підземного акумулювання в опалювальний період у середньому покриває 20% теплових навантажень, які виникають в мікрорайоні з 3 тисяч мешканців. Однак температура отриманих теплоносіїв не задовольняє вимогам, що необхідні для теплопостачання будівель, але дозволяє використовувати їх як низькопотенційне джерело енергії в теплових насосах. У період охолодження система спільно зі зрошувальними форсуночними камерами покриває 90% виникаючих навантажень.

2.2. Обґрунтування можливості активізації теплового ресурсу водоносних вуглевміщуючих порід за рахунок підземного спалювання вугілля

Стосується перспективного способу розробки зосереджених на відпрацьованих ділянках залишкових та некондиційних запасів вугілля шляхом підземного спалювання (Sadovenko, Rudakov, & Inkin, 2014; Falshtynskyy, Dychkovskyy, Lozynskyy, & Saik, 2012). Незважаючи на віковий досвід розвитку та істотні переваги (ліквідація небезпечної праці гірників, скорочення зростання обсягу породних відвалів і підвищення стійкості природного середовища), ця технологія не отримала поширення через низький коефіцієнт корисної дії, який визначається як відношення зосередженого у горючому газі тепла до загального тепла спалюваного палива. Для підвищення цього показника розроблений спосіб, який заснований на відборі підземних вод, що нагріваються при підземному спалюванні вугілля (ПСВ) і розроблена математична модель, яка описує даний процес (Рис. 3).

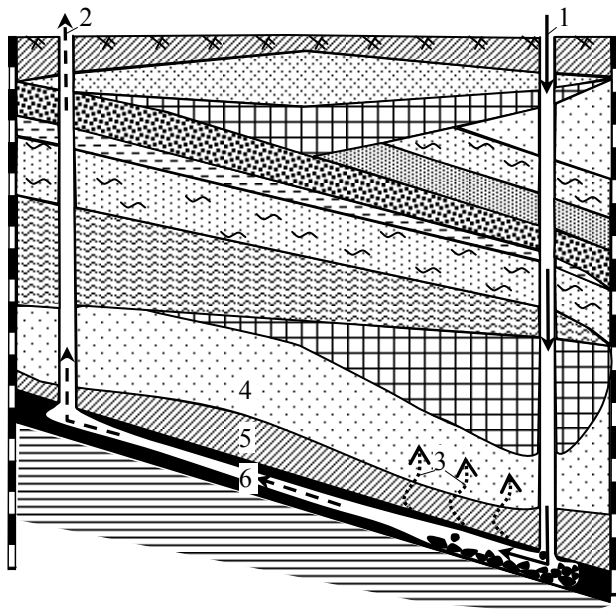


Рисунок 3. Проектна схема нагріву підземних вод при ПСВ: 1 – напрямок руху дуття; 2 – напрямок руху горючого газу; 3 – напрямок руху теплового потоку; 4 – водоносний пласт; 5 – розділюючий пласт; 6 – вугільний пласт

Розроблена модель фільтрації та теплопереносу в обводнених породах покрівлі при спалюванні пласта дозволяє визначити конвективну і кондуктивну скла-

дові теплового потоку, який надходить з реакційного каналу у водоносний горизонт основної покрівлі:

$$q_0(t) = q_{cv}(t) + q_{cd}(t); \quad (5)$$

$$q_{cv} = Q_g C_g \rho_g (T_g - T_w); \quad (6)$$

$$Q_g = \frac{\kappa}{\mu_g} \cdot \frac{P_g^2 - P_{atm}^2}{2P_{atm} \cdot L_g} \cdot S_{cv}; \quad (7)$$

$$q_{cd}(t) = S_{cd} \lambda_p \cdot \left. \frac{\partial T(t)}{\partial z} \right|_{z=m_0}, \quad (8)$$

де:

$q_{cv}(t)$ і $q_{cd}(t)$ – конвективна і кондуктивна складові теплового потоку;

Q_g – об’ємний потік газу в тріщинах порід покрівлі;

μ_g – в’язкість газу;

ρ_g – густина газу;

C_g – теплоємність газу;

T_g – температура газу;

P_g – тиск газу у реакційному каналі;

κ – проникність порід покрівлі;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності порід покрівлі;

T_w – температура води у водоносному горизонті;

L_g – довжина шляху фільтрації газу до рівня, де підтримується атмосферний тиск.

Реалізований принцип збільшення площі конвективного (S_{cv}) і кондуктивного (S_{cd}) теплообміну за рахунок розвитку зони спалювання в часі адекватно відображує зміни теплового потоку залежно від потужності водотриву і стадії спалювання вугілля. Чисельним аналізом теплового балансу встановлено, що до завершення спалювання вугільного пласта у розташований вище водоносний горизонт покрівлі пласта може надійти понад 60% тепла, акумульованого вміщуючими породами (Рис. 4). Цифрами вказана кількість тепла (ТДж) і його частка (%) від теплової енергії спалюваного вугілля.

Для визначення температури підземних вод у розташованому над реакційним каналом водоносному горизонті на його підшві виділявся об’ємний блок порід у вигляді паралелепіпеда (Рис. 5). Баланс тепла у блоці встановлювався на основі рівності кількості тепла (U_{Σ}), що надходить до блоку чи виноситься з нього за проміжок часу τ та кількості тепла, яке витрачається на нагрівання підземних вод і гірських порід безпосередньо в блоці ($U_{нагр}$):

$$U_{\Sigma} = (q_0 + q_1 - q_2 - q_3)\tau = U_{нагр} = (T_1 - T_0) \cdot B; \quad (9)$$

де:

$$q_1 = AT_w;$$

$$q_3 = D \cdot \left(\frac{T_1 + T_0}{2} - T_w \right);$$

$$A = \Delta y \cdot \Delta z \cdot v \cdot C_w \rho_w;$$

$$B = \rho_w C_w V_w + \rho_{sk} C_{sk} V_{sk};$$

$$D = \frac{\lambda \Delta x \Delta y}{\Delta z};$$

T_0, T_1 – відповідно температура води і порід у блоці сітки розмірами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ на початку і в кінці проміжку часу τ ;
 v – швидкість фільтрації;
 V_w, V_{sk} – об’єм води і порід у блоці;
 q_0 – тепловий потік від реакційного каналу;
 q_1 і q_2 – конвективні потоки тепла уздовж напрямку фільтраційного потоку;
 q_3 – кондуктивний тепловий потік від блоку до сусіднього блоку, розташованого вище.

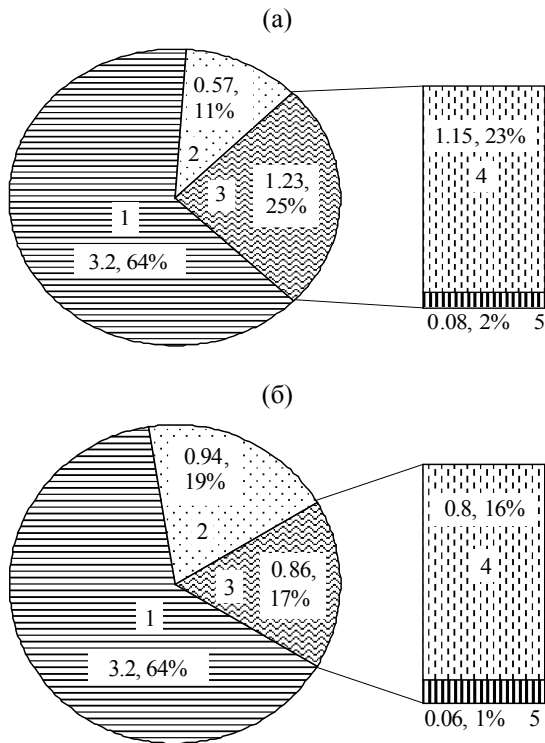


Рисунок 4. Баланс теплової енергії при ПСВ: (а) з потужністю водотриву 3 м; (б) з потужністю водотриву 7 м; 1 – хімічне тепло (що міститься у газі); 2 – фізичне тепло (поглинене породним масивом); 3 – тепло, що надходить у водоносний горизонт; 4 – кондуктивне тепло; 5 – конвекційне тепло

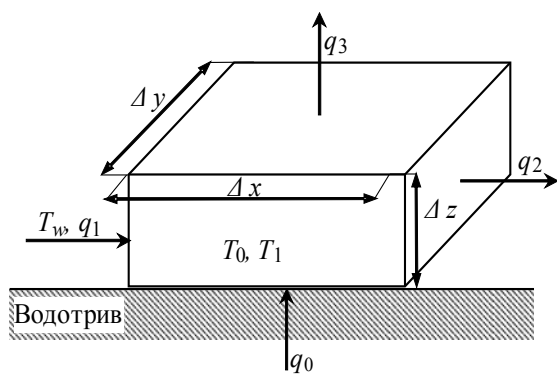


Рисунок 5. Схема балансу тепла у блоці водоносного пласта над покрівлею реакційного каналу

У результаті послідовних розрахунків за запропонованою формулою можна встановити зміну температури блока водоносних порід, які залягають над покрівлею реакційного каналу. При цьому поперед-

ньо необхідно розрахувати сумарну величину теплового потоку з каналу і швидкість фільтрації підземних вод шляхом вирішення гідродинамічної задачі. Для знаходження розподілу температури у водоносних породах встановлена температура блоку задається в елементі скінченно-різницевої сітки чисельної моделі переносу тепла в програмі ModFlow, що вже була протестована (Рис. 1). В інших елементах цієї моделі (поза реакційного каналу) встановлюються відповідні граничні умови.

Верифікація запропонованої моделі була проведена на основі масштабного науково-промислового експерименту з ПСВ на ділянці “Нанна – 1” родовища вугілля Rocky Mountain у США. Оцінена динаміка зміни рівня підземних вод, під дією модулів спалювання, узгоджується з фактичними даними протягом більшої частини періоду епігнозу з абсолютною похибкою 2 – 6 м при адекватному відображенні воронки депресії. Зіставлення натурних і модельних даних температури води у свердловинах показало, що результати розрахунку відповідають фактичній зміні температури у водоносному горизонті, який залягає над реакційним каналом, при цьому абсолютна похибка розрахунків не перевищує 5°C (Рис. 6).

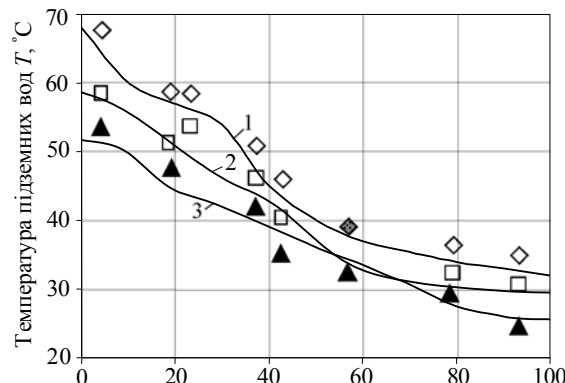


Рисунок 6. Динаміка зміни температури підземних вод на ділянці “Нанна – 1”: — за даними моделювання; 1 – відповідно у свердловинах TW 3, TW 4 і EMW 1; за натурними даними: ◇ – свердловина TW 3; □ – свердловина TW 4; ▲ – свердловина EMW 1

Шляхом моделювання теплопереносу оцінено розміри, форму і температуру теплових зон, які формуються в пісковиках залежно від кута їх падіння та стадії спалювання вугілля. Температурні аномалії у водоносних породах непостійні у часі та просторі, можуть сягати 70°C і потребують розробки геотехнологічних схем освоєння (Рис. 7).

За допомогою відомих критеріїв придатності вугільних пластів для підземного спалювання та оцінених параметрів водоносних пластів для накопичення теплової енергії проведено геолого-гідрогеологічне діагностування ділянки “Ольхова Нижня” Чистяково-Сніжнянського гірничо-промислового району Донбасу. Визначено, що на досліджуваній території найбільш раціональне підземне спалювання некондиційного вугільного пласта h_{10}^1 з використанням у якості теплоносія підземних вод верхніх “бабаковських” пісковиків $h_{10}Sh_{11}$ потужністю до 60 м.

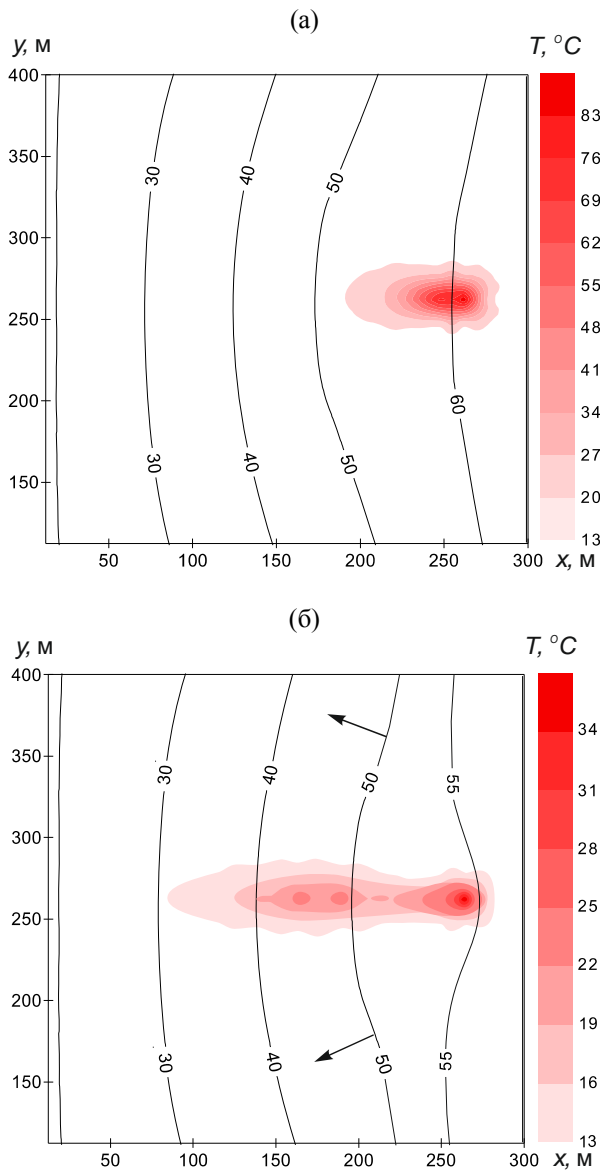


Рисунок 7. Розподіл рівня підземних вод на площі $x \times y$ (ізолінії) та їх температури (відтінки) у “бабаковських” пісковиках при спалюванні вугільного пласта h_{10}^1 : (а) по закінченні спалювання 30 діб; (б) по завершенні відбору нагрітих вод 180 діб

2.3. Термогідродинамічна оцінка ефективності використання теплового й ємнісного потенціалів затопленого шахтного поля

Дана оцінка виконана на прикладі проектного геотермального модуля в межах затопленої шахти “Новгородівська 2”, що ліквідується (Красноармійський вуглепромисловий район Донбасу). Площа шахтного поля, представленого в орогідрографічному плані вододільним плато, складає 20 км^2 . У межах шахтного поля промисловими є два вугільних пласти, які залягають під гідравлічно зв’язаними водоносними горизонтами на відстані 25 – 30 м один від одного. У межах шахти знаходиться понад 8 млн тонн вугілля, зосередженого у залишкових і некондиційних запасах, придатних за своїми фізико-хімічними характеристиками для розробки способом підземного спа-

лювання. Водоносні породи представлені вапняком L_1 потужністю до 5 м і пісковиками L_1s_1 і l_1s_3 з середньою потужністю 15 і 20 м відповідно. Верхнє розташування вугільного пласта l_1 , який відпрацьовувався раніше пласта k_8 , зумовило надходження водопритоків у розташовані вище гірничі виробки. Такий характер залягання вугільних пластів формував водопритоки у кожному з розглянутих вугільних пачок і визначав наступний підхід до геофільтраційної схематизації шахтного поля.

Геофільтраційна модель шахти, створена в ліцензійному програмному комплексі ModFlow, відображає два промислових пласти, міжпластя, що їх розділяє, а також покрівлю пласта l_1 і підшову пласта k_8 , тобто модель містить п’ять шарів з кутами падіння, які відповідають їхнім гірничо-геологічним умовам та має площу 20 км^2 ($4000 \times 5000 \text{ м}$). Потужності продуктивних товщ на моделі приймалися у відповідності із залежністю проникності підробленого породного масиву від кратності його підробки, у середньому рівними 10 – 40 потужностям вугільного пласта (Рис. 8).

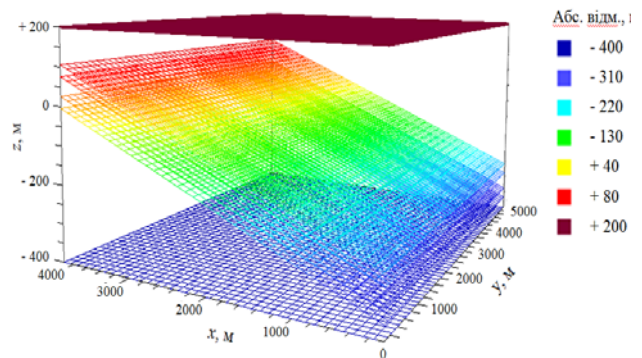


Рисунок 8. Тривимірне уявлення геометрії геофільтраційної моделі шахти “Новгородівська 2”

При заданні зовнішніх меж модельованої області тектонічне порушення (Новгородівський скид) приймалося у вигляді непроникної в гідродинамічному відношенні межі. На південному заході та південному сході, де вугільні пласти мають безпосередній гідравлічний зв’язок із водоносними палеогеново-неогеновими відкладами, задавалася гранична умова третього роду, яка відображала взаємозв’язок величини витрати потоку підземних вод цих відкладень у продуктивну товщу з різницею гідродинамічних напорів у них. У місцях перетоків підземних вод між шахтами “ім. Коротченка” – “Новгородівська 2” і “Новгородівська 2” – “Новгородівська 1” встановлювалися граничні умови другого роду з витратами, відповідними їх питомим значенням.

Внутрішніми межами геофільтраційної моделі шахти є очисні виробки, які відображаються граничними умовами першого роду з величиною гідродинамічного рівня, що відповідає абсолютній відмітці підшови вугільних пластів. Положення цих меж визначалося шляхом побудови плану гірничих виробок у програмному середовищі AutoCAD і перенесення контурів виїмкових ділянок на шари моделі. При моделюванні затоплення шахти внутрішні граничні умови виключалися.

Для оцінки адекватності розробленої геофільтраційної моделі шахти була вирішена обернена задача, мета якої полягала у коригуванні гідродинамічної ролі зовнішніх меж водоносних пластів та їх фільтраційних властивостей. Основою рішення були спостереження за графіком затоплення ствола шахти і гідродинамічні виміри. Аналіз результатів показує, що на моделі вдалося практично повністю відобразити нестационарну динаміку підйому рівня води в системі гірничих виробок і масиві у процесі ліквідації шахти. При цьому похибка розрахунків рівнів знаходиться у межах 3 – 11 м, а відносна не перевищує 10%.

За допомогою протестованої геофільтраційної моделі шахти було встановлено прогнозне положення рівня підземних вод на заданий момент часу і передбачувану дату запуску в роботу геотермального модуля. Для оцінки природного теплового потенціалу вод шахти приймалося, що в обводнений масив надходить тепловий потік q , обумовлений виділенням тепла в земних надрах. Зверху, нижче 6 – 7 м від денної поверхні, залягає нейтральний шар порід, температура якого постійна і дорівнює середньорічній температурі в регіоні (приблизно $+10^{\circ}\text{C}$). За цих умов рівняння теплопровідності відносно вертикальної осі H з урахуванням конвекції має вигляд:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial H^2} - \frac{v_e}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial H} = 0, \quad (11)$$

при наступних граничних умовах:

$$T = T_1 \text{ при } H = H_1; \quad q = -\lambda \partial T / \partial H \text{ при } H = H_2. \quad (12)$$

Загальне рішення цього рівняння має вигляд:

$$T = T_1 + \frac{q}{\lambda B} [\exp B(H - H_2) - \exp B(H_1 - H_2)]. \quad (13)$$

При цьому тепловий потенціал шахтних вод, які містяться в затопленому масиві, визначається з виразу:

$$Q = C \cdot \rho \cdot T \cdot V_{об}, \quad (14)$$

де:

$$B = \frac{v_e}{a};$$

T_1, H_1 – температура та відстань до нейтрального шару;

H – глибина залягання;

a – температуропровідність водонасичених порід;

v_e – вертикальна швидкість фільтрації;

Q – кількість теплоти;

$C, \rho, T, V_{об}$ – питома теплоємність, густина, температура та об'єм шахтних вод відповідно.

Результати розрахунків температури шахтних вод добре узгоджуються з фактичними даними, отриманими в результаті моніторингу за гідродинамічним режимом шахти. Сумарний тепловий ресурс вод, які знаходяться у затопленому масиві, визначався погоризонтно залежно від обсягу виробленого простору, і складає 1300 ТДж. Освоєння теплового ресурсу вод шахти “Новгородівська 2” для тепло- і холодопостачання будівель пов'язане з періодичною зміною їх температури через її відмінності у затопленому масиві та на денній поверхні, а також втрат тепла під час руху води по свердловинах. Проведені термодинамічні розрахунки геофільтрації у виробленому масиві, основані на результатах числового моделювання та аналітичних рішеннях, показали, що сумарні тепловтрати в процесі відбору, накопичення і зберігання шахтних вод не перевищують 15%.

Досліджені зміни температури шахтних вод під час охолоджувального та опалювального періодів дають можливість оцінити рентабельність їх застосування в теплових насосах (Рис. 9). За основний показник ефективності насосів приймалися коефіцієнти перетворення тепла K_T і холоду K_X , що являють собою відношення теплопродуктивності насосів до споживаної ними електроенергії. Аналіз отриманих результатів показує, що при застосуванні шахтних вод у тепловому насосі досягаються найбільші коефіцієнти перетворення тепла в порівнянні з іншими альтернативними варіантами.

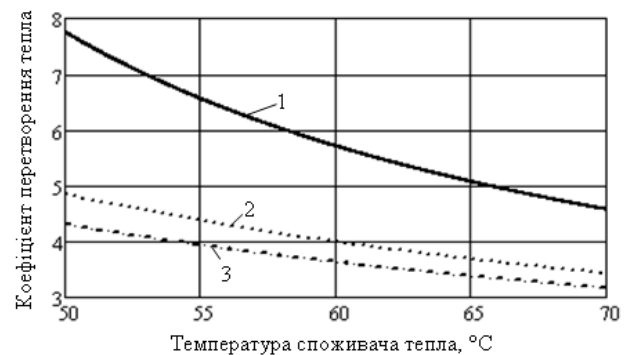


Рисунок 9. Ефективність роботи теплового насоса при використанні різних низкопотенційних джерел енергії: 1 – шахтних вод; 2 – ґрунтів; 3 – поверхневих водотоків

2.4. Технологічна схема геомодуля

Отримані результати динаміки температури шахтних вод дозволили розробити технологічну схему освоєння теплового ресурсу затопленого шахтного поля (Рис. 10). В літній період зосереджена у затоплених гірничих виробках шахти “Новгородівська 2” в інтервалі 0 – 100 м вода, яка має середню температуру $+12^{\circ}\text{C}$, через куш “холодних” свердловин відкачується на денну поверхню і надходить в теплові насоси. Після чого вода, нагріта в результаті кондиціонування будівель до температури зовнішнього повітря ($\approx 30^{\circ}\text{C}$), через куш “тепліх” свердловин повертається в затоплені виробки, але вже на горизонт $-300 \dots -400$ м з середньою температурою 26°C . Через два місяці після припинення охолодження приміщень (закінчення літа) вода з нижніх горизонтів через “теплі” свердловини знову подається на денну поверхню і використовується як джерело низькопотенційної енергії в теплових насосах для обігріву будівель. Віддавши тепло й охолонувши до 7°C , відпрацьована вода через “холодні” свердловини знову надходять на горизонт 0 – 100 м. Тривалість цього етапу експлуатації геомодуля становить п'ять місяців (листопад – березень), після чого настає двомісячний період простою, упродовж якого можуть проводитися ремонтно-профілактичні роботи.

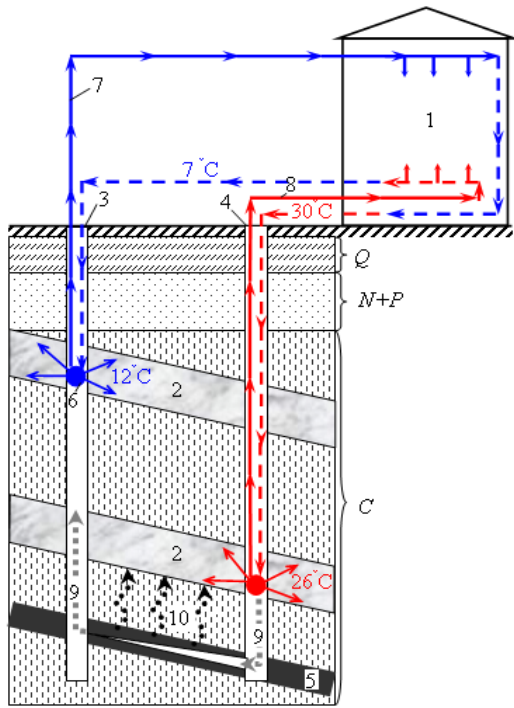


Рисунок 10. Технологічна схема геомодуля на території шахтного поля: 1 – будівля; 2 – продуктивна товща із затопленими гірничими виробками; 3 – “холодна” свердловина; 4 – “тепла” свердловина; 5 – некондиційний вугільний пласт; 6 – накер; 7, 8 – шлях руху шахтних вод з “холодної” та “теплої” свердловин; 9, 10 – напрямки течії дуттьового і теплового потоків при спалюванні вугілля

Область використання розглянутого технологічного рішення обмежується температурою шахтних вод, що нижче вимог, які ставляться для теплопостачання будівель. Це обумовлює можливість їх застосування як низкопотенційного джерела енергії в теплових насосах та системах опалення “тепла підлога”, що потребують значних капітальних витрат на їх монтаж й обслуговування. Разом з тим, нагрів води (наприклад шахти “Новгородівська 2”) до кондиційного стану можливий при роботі геомодуля за другим технологічним варіантом, який припускає підвищення їх температури за рахунок підземного спалювання некондиційних пластів вугілля протягом 100 діб (листопад – січень) і відкачування води з верхніх затоплених виробок. На основі проведеного моделювання процесів фільтрації та теплопереносу встановлено, що тепловий потік у розмірі 500 – 580 ГДж/добу, який утворюється при спалюванні вугілля й відборі нагрітих вод, під час опалювального періоду практично повністю покриває теплові потреби м. Новгородівка, розташованого в 10 км від шахти, з населенням у 15 тис. чол.

Гідрогеотермальний модуль в умовах шахти “Новгородівська 2” в опалювальний період дозволяє отримати річну економію умовного палива до 80 – 120 тонн. Модуль характеризується позитивними значеннями чистої дисконтної вартості (18 – 20 тис. дол./ГДж/рік) та відповідає світовим нормативам раціонального застосування геотермальних циркуляційних систем у природних колекторах.

3. ВИСНОВКИ

Чисельна модель фільтраційного теплопереносу у водоносному горизонті збігається з класичним рішенням термодинаміки з точністю до 2°C, що дозволило для гідрогеологічних і кліматичних умов Донбасу встановити коефіцієнт акумуляції теплової енергії геодинамічної системи за рахунок збереження літнього тепла і зимового холоду в порушених водоносних пластах у діапазоні 0.8 – 0.9, який задовольняє світовим нормативам ефективного застосування теплообмінників у геологічних структурах.

При спалюванні некондиційного вугільного пласта затопленої шахти у водоносному горизонті основної покрівлі накопичується понад 60% тепла, яке надходить з реакційного каналу, що дозволяє залежно від потужності розділюючого шару порід безпосередньої покрівлі та стадії спалювання підвищити температуру підземних вод до 40 – 90°C і шляхом їх відбору збільшити коефіцієнт корисної дії запатентованої геотехнології на 18 – 25%.

Сумарні тепловтрати в процесі відбору, накопичення й зберігання шахтних вод не перевищують 15%, а їх застосування з температурою 26 – 28°C реалізується з коефіцієнтом перетворення тепла до 7.5, що дозволяє ефективно використовувати тепловий та ємнісний ресурси затоплених шахт за рахунок сезонного відбору та закачування вод різних горизонтів за двома технологічними варіантами: перший – шляхом використання шахтних вод як низкопотенційного джерела енергії в теплових насосах; другий – підвищенням їх температури шляхом підземного спалювання залишкових запасів вугілля.

ВДЯЧНІСТЬ

Дана стаття була б неможлива без результатів прикладної науково-дослідної роботи “Обґрунтування комплексу геотехнологічних модулів з використання природно-техногенного ресурсу родовищ корисних копалин України”, яка виконувалась в Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» за рахунок видатків загального фонду державного бюджету (№ ДР 0115U002300).

REFERENCES

- Arens, V. (2001). *Physical and Chemical Geotechnology*. Moscow: MGU.
- Boyko, V. (2015). Prerequisites and Prospects for Normalization of Thermal Conditions in Headings of Deep Mines of Donets Basin. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 103-118.
- Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V., & Saik, P. (2012). New Method for Justification the Technological Parameters of Coal Gasification in the Test Setting. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 201-208. <https://doi.org/10.1201/b13157-35>
- Gazaliyev, A., Portnov, V., & Kamarov, R. (2015). Geophysical Research of Areas with in Increased Gas Content of Coal Seams. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 24-29.
- Kreinina, E.V. (2003). Modern Gas Radiation Tubes with Ceramic Frame. *Metal Science and Heat Treatment*, 45(1/2), 39-40. <https://doi.org/10.1023/a:1023900213940>

- Logunov, D. (2011). On the Issue of Alternative Energy Sources Use in Ukraine. Geothermal Energy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 58-61.
- Lustiuk, M., Diakon, V., & Petrina, M. (2013). Mathematical Model For Mineral Reserves Evaluation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 5-10.
- Perov, M., & Makarov, M. (2010). The Influence of Anthropogenic Loads of the Coal Industry on the Environment. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (7-8), 99-103.
- Rudakov, D., Sadovenko, I., & Inkin, O. (2012). Modeling of Heat Transport in an Aquifer during Accumulation and Extraction of Thermal Energy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 40-45.
- Sadovenko, I., Rudakov, D., & Inkin, O. (2014). Geotechnical Schemes to the Multi-purpose Use of Geothermal Energy and Resources of Abandoned Mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 443-450. <https://doi.org/10.1201/b17547-76>

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Теоретичне та технологічне обґрунтування параметрів і схем формування та використання природно-техногенного теплового й емнісного ресурсів відпрацьованих вугільних родовищ за допомогою комплексу геомодулів, які забезпечують їхню активізацію, відбір і зберігання синхронно з сезонною нерівномірністю споживання енергоносіїв.

Методика. Аналітичні та чисельні методи рішення рівнянь гідрогазодинаміки та тепломасопереносу; математичне моделювання із застосуванням спеціального програмного забезпечення; методи статистики; стабілометричні випробування зразків водоносних порід на приладі тривісного стиснення.

Результати. Розроблений комплекс моделей газодинамічних, фільтраційних і теплових процесів, які протікають у порушеному масиві та обумовлені розробкою його природно-техногенних ресурсів і згортанням гірничих робіт. Досліджено закономірності руху води та газів у слабопроникних вуглевмісних породах, пластах-колекторах і затоплених гірничих виробках, які дозволили обґрунтувати технологічні параметри відбору, акумуляції та використання теплоносіїв для тепло- і холодопостачання будівель. Запропоновані й обґрунтовані технологічні варіанти використання теплового ресурсу вод, які знаходяться у затопленій шахті, та його активізацію за рахунок підземного спалювання залишкових запасів вугілля.

Наукова новизна. Досліджено механізм теплопереносу в затопленому гірничому масиві ліквідованої шахти, що супроводжується періодичним закачуванням та відбором шахтних вод різних горизонтів, а також їх нагріванням природним геотермічним теплом і підземним спалюванням залишкових запасів вугілля.

Практична значимість. Розроблені моделі застосовані на реальних об'єктах у гірничопромислових районах з визначенням діапазонів параметрів гідродинамічного і теплового режимів, в яких створюються умови для відбору та використання енергоносіїв на завершальному етапі відпрацювання вугільних родовищ. На основі моделей та одержаних закономірностей обґрунтовані параметри технологічних схем розробки природно-техногенних ресурсів вугільних родовищ.

Ключові слова: *вугільне родовище, порушений масив, гідророзрив, водоносне газосховище, підземне спалювання вугілля, моделювання, геомодуль*

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Теоретическое и технологическое обоснование параметров и схем формирования и использования природно-техногенного теплового и емкостного ресурсов отработанных угольных месторождений с помощью комплекса геомодулей, обеспечивающих их активизацию, отбор и хранение синхронно с сезонной неравномерностью потребления энергоносителей.

Методика. Аналитические и численные методы решения уравнений гидрогазодинамики и тепломассопереноса; математическое моделирование с применением специального программного обеспечения; методы статистики; стабиллометрические испытания образцов водоносных пород на приборе трехосного сжатия.

Результаты. Разработан комплекс моделей газодинамических, фильтрационных и тепловых процессов, протекающих в нарушенном массиве и обусловленных разработкой его природно-техногенных ресурсов и сворачиванием горных работ. Исследованы закономерности движения воды и газов в слабопроницаемых углевмещающих породах, пластах-коллекторах и затопленных горных выработках, которые позволили обосновать технологические параметры отбора, аккумуляции и использования теплоносителей для тепло- и холодноснабжения зданий. Предложены и обоснованы технологические варианты использования теплового ресурса вод, находящихся в затопленной шахте, и его активизации за счет подземного сжигания остаточных запасов угля.

Научная новизна. Исследован механизм теплопереноса в затопленном горном массиве ликвидированной шахты, сопровождающийся периодической закачкой и отбором шахтных вод различных горизонтов, а также их нагреванием естественным геотермическим теплом и подземным сжиганием остаточных запасов угля.

Практическая значимость. Разработанные модели применены на реальных объектах в горнопромышленных районах с определением диапазонов параметров гидродинамического и теплового режимов, в которых создаются условия для отбора и использования энергоносителей на завершающем этапе отработки угольных месторождений. На основе моделей и полученных закономерностей обоснованы параметры технологических схем разработки природно-техногенных ресурсов угольных месторождений.

Ключевые слова: *угольное месторождение, нарушенный массив, гидроразрыв, водоносное газохранилище, подземное сжигание угля, моделирование, геомодуль*

ARTICLE INFO

Received: 15 September 2016

Accepted: 5 October 2016

Available online: 30 December 2016

ABOUT AUTHORS

Ivan Sadovenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 1/54, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: inkin@ua.fm

Oleksander Inkin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 1/54, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: inkin@ua.fm

Alina Zagrytsenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Hydrogeology and Engineering Geology Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 1/54, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: alinanik@bigmir.net