

© І.О. Садовенко¹, В.І. Тимошук¹, А.М. Загриценко¹, Є.А. Шерстюк¹

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

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ЄМНІСНОГО РЕСУРСУ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ГЕОМЕХАНІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ПОРУШЕНОГО ГІРСЬКОГО МАСИВУ

© I.O. Sadovenko, V.I. Tymoshchuk, A.M. Zahrytsenko, Y.A. Sherstiuk

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GROUNDWATER RESOURCE STORAGE CAPACITY AND GEOMECHANICAL STABILITY OF A DISTURBED ROCK MASSIF

Мета. Оцінка ємнісних ресурсів виробленої і затопленої ділянки шахтного поля для визначення гідргеомеханічних ризиків, попередження проявів аварійних водопритоків та обґрунтування інженерних заходів захисту в зоні впливу водного об'єкту.

Методика. Прогнозні розрахунки виконані з використанням методів чисельного математичного моделювання гідродинамічних та геомеханічних процесів, що реалізовані методом кінцевих різностей та кінцевих елементів, відповідно. Методика моделювання передбачає рішення серії обернених задач, що в умовах багатофакторності впливу та невизначеності стану гірського масиву, дозволяє отримувати прогнози високої достовірності.

Результати. Домінуючий вплив на формування водопритоків до проектних виробок в зоні впливу затопленої ділянки шахтного поля мають пісковики основної покрівлі вугільного пласту. Затоплені гірничі виробки в умовах підвищеної гідравлічної проникності виконують роль контуру забезпеченого живлення, що виражається у збереженні гідравлічних напорів над проєктованими штреками.

Залучення в зону позамежного деформування запроектованих виробок відбувається при їх розташуванні на відстані менше ніж 20,0 м від затопленого контуру, а вихід поза межі зони деформацій зрушень – при віддаленні на відстань до 30,0 м. Розрахунковий варіант, де проектні виробки проводяться на відстані 20 м від контуру затоплення, за гідргеомеханічним станом породного масиву є найбільш оптимальним.

Оскільки геотехнічна ситуація визначається значною кількістю вірогіднісних характеристик (властивості порід, показники водопритоків, межа затоплення і терміни її формування, точність відображення геологічної будови ділянки), а також суттєвим впливом структурно-текстурної будови порід навколо затоплених виробок, розроблені технологічні заходи проведення гірничих виробок під захистом гідродинамічної депресії.

Наукова новизна. Встановлені закономірності формування складових водного балансу на ділянці впливу затоплених виробок та залежність геомеханічних параметрів стійкості масиву від стану виробленого простору, величин напорів, розмірів бар'єрного цілика.

Практична значимість. Обґрунтовані параметри бар'єрного цілика, що дозволяють мінімізувати гідргеомеханічні ризики та втрати корисних копалин. Надані рекомендації щодо порядку ведення гірничих робіт у зоні впливу затоплених виробок під захистом гідродинамічної депресії.

Ключові слова: затоплені виробки, геофільтрація, гідргеомеханічний стан, математичне моделювання, водозахисні заходи.

Вступ. В умовах численних безпекових загроз і руйнування агресором енергетичної системи країни вуглевидобувна промисловість залишається важливою складовою енергетичного фронту. Проте відпрацювання запасів дедалі ведеться в складних гідрогеологічних умовах, де баланс між повнотою виймання корисних копалин [1, 2] і безпекою ведення гірничих робіт [3–6] стає критично важливим.

Саме такі завдання постають при веденні гірничих робіт в зоні впливу відпрацьованих і затоплених виробок. Галузевою Інструкцією передбачено два способи попередження проривів води, серед яких наявність бар'єрного цілика між затопленими і проведеними виробками, а також спуск води із затопленої зони за спецпроектном. Розрахунок ширини бар'єрного цілика виконується за аналітичною залежністю, де розміри цілика визначаються потужністю пласта, що виймається, глибиною залягання і протяжністю затопленої виробки. При цьому не враховуються фільтраційні і ємнісні параметри порід цілика і затопленої товщі, величини напорів.

Аналіз фактичних даних про параметри і стан бар'єрних вугільних ціликів [7] показує, що розрахунки за даною методикою виконуються з невиправданим запасом надійності, а це призводить до необґрунтованих втрат корисних копалин.

В умовах багатофакторності і невизначеності стану техногенно порушеного гірського масиву високу прогностичну здатність мають чисельні гідродинамічні та геомеханічні моделі [8–11].

Мета роботи визначена виробничою необхідністю і полягає в оцінці впливу ємнісних ресурсів виробленого і затопленого простору шахти «Дніпровська» на безпеку ведення гірничих робіт на полі суміжної шахти «Самарська». Для визначення гідрогеомеханічних ризиків і попередження небезпек необхідно реалізувати наступні кроки:

- 1) кількісно оцінити динаміку водопритоків до розкривних і очисних виробок у відповідності до визначеного хронологічного графіку проведення дренажного і вентиляційного штреків;
- 2) визначити оптимальні параметри бар'єрних ціликів і розташування виробок, що убезпечують від аварійних притоків води з боку відпрацьованого і затопленого простору сусідньої шахти;
- 3) розробити рекомендації щодо безпечного проведення гірничих робіт та попередження аварійних ситуацій в зоні впливу затоплених виробок.

Одним з найсучасніших і водночас найскладніших методів оцінки і прогнозування гідродинамічних ризиків в умовах з багатьма невідомими є чисельне математичне моделювання [11–12].

Гідрогеологічні моделі східної групи шахт Західного Донбасу, в тому числі і вищезазначених шахт, були попередньо створені для рішення задач водорегулювання в умовах планового згортання і ведення гірничих робіт [8, 12]. Проте для гідродинамічних оцінок в межах окремих гірничих виробок (штреків і лав) застосовуються інші методичні підходи, що передбачають побудову моделі-

врізки локального рівня. Зміна масштабу моделювання і детальності відображення граничних умов дозволить досягти максимальної функціональної відповідності моделі фактичним гірничо-геологічним умовам.

Основна частина. Для оцінки гідродинамічного впливу затопленого простору відпрацьованих гірничих виробок на проведення розкривних і очисних виробок розроблена планово-просторова геофільтраційна модель, що охоплює західне крило шахти «Дніпровська» і проєктовані площі шахти «Самарська». Ситуаційний план гірничих робіт на ділянці досліджень представлений на рисунку 1.

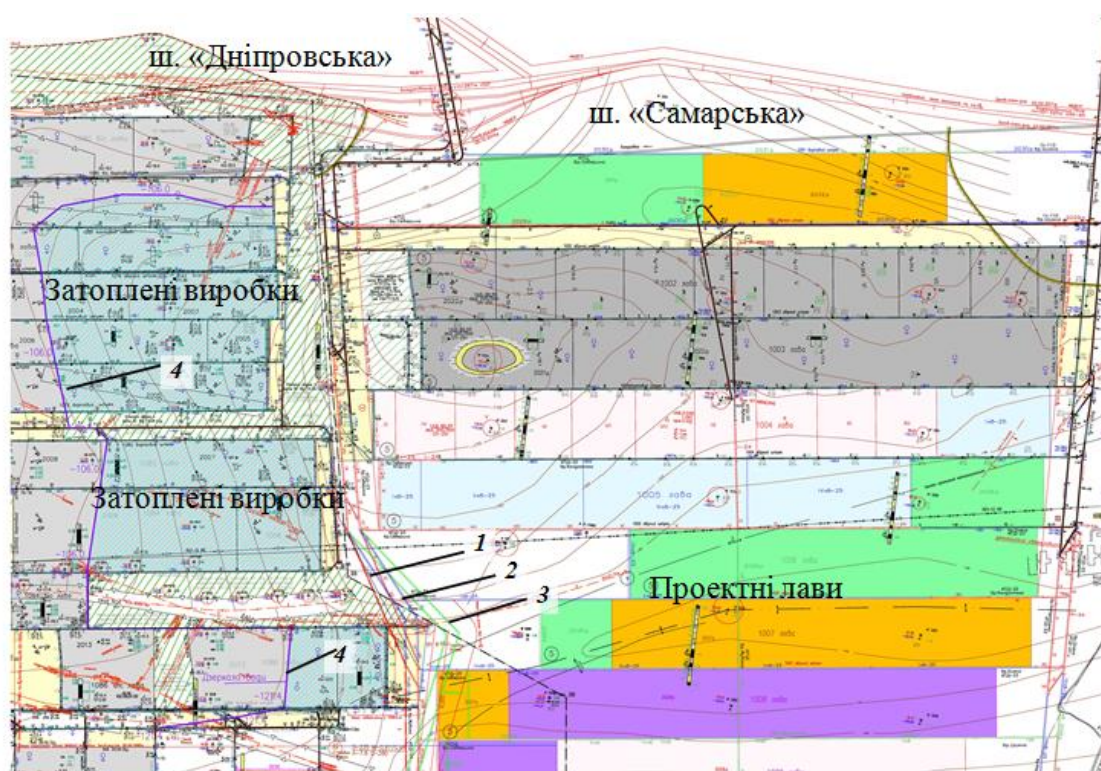


Рис. 1. Ситуаційний план гірничих робіт по пласту с₁₀^В з проєктним положенням дренажного і вентиляційного штреків: 1, 2, 3 – варіанти проведення розкривних виробок; 4 – контур затоплення виробок

Чисельна модель геофільтрації, реалізована у програмному комплексі Visual MODFLOW, представляє собою модель тривимірного потоку підземних вод постійної густини в пористому середовищі і описується диференціальним рівнянням у часткових похідних [13, 14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

де k_{xx} , k_{yy} і k_{zz} – гідравлічна проникність у напрямку координатних осей x , y і z ; h – шукана функція напору; W – одинична витрата потоку: для вхідного потоку $W > 0$, для вихідного потоку – $W < 0$; S_s – питома ємність пористого середовища; t – час.

Рівняння (1) разом з граничними і початковими умовами описує тривимірний нестационарний потік підземних вод в гетерогенному і анізотропному середовищі за умови, що основні напрямки гідравлічної проникності співпадають з напрямками координатних осей.

Для розв'язку рівняння (1) в чисельній моделі використовується метод кінцевих різниць, для чого виконується дискретизація області фільтрації прямокутною сіткою на окремі розрахункові блоки. В межах кожного блоку існує лише одна точка, яка називається вузловою, і для якої розраховується значення напору.

Етапу побудови гідродинамічної моделі передує етап систематизації і аналізу даних про гідрогеологічні, геомеханічні й гірничотехнічні умови ділянки шахтного поля, за результатами якого визначені:

- природні та гірничо-технологічні чинники формування водопритоків у гірничі виробки шахти;
- закономірності раптових водопроявів у шахти району;
- фільтраційні та ємнісні властивості водоносних горизонтів і слабопроникних шарів.

Розміри гідродинамічної моделі-врізки ділянок шахтних полів ш. «Дніпровська» і ш. «Самарська» визначені в умовних прямокутних координатах 3800...8000 м і 2200...6000 м, що відповідає лінійним параметрам моделі 4200 м і 3800 м при загальній площі 15.96 км² (рис. 2).

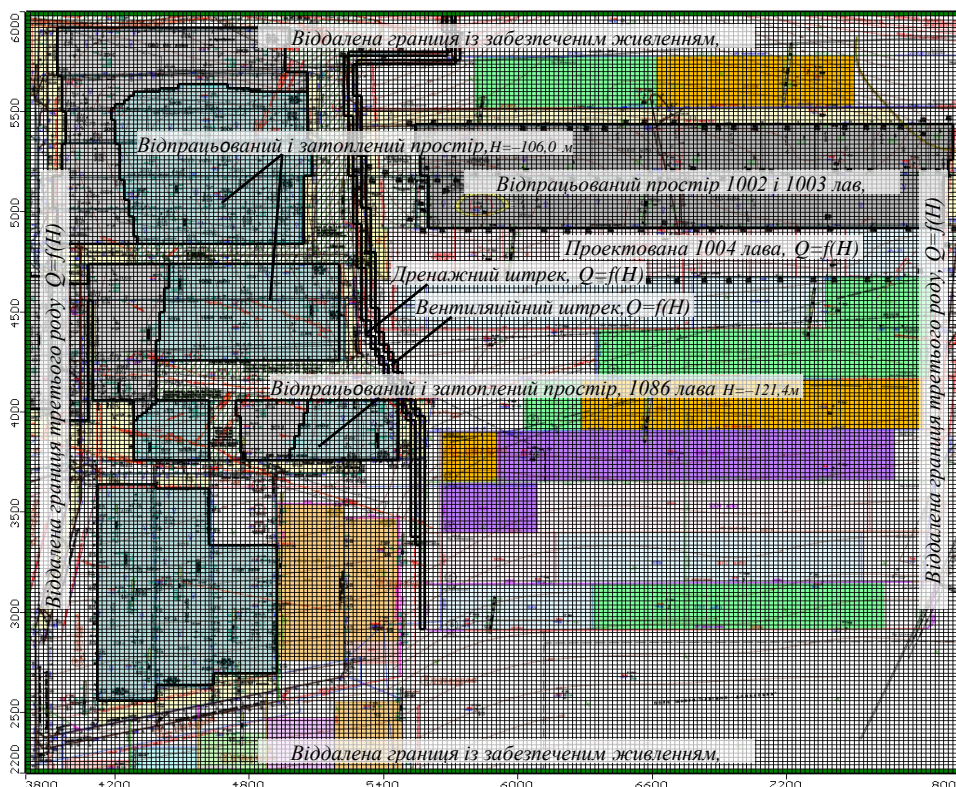


Рис. 2. Гідродинамічна схематизація модельованої області в межах західного крила шахти «Дніпровська» і ділянки відпрацювання пласта с₁₀^В шахтою «Самарська»

Забезпечення необхідного рівня деталізації відпрацьованих і проєктованих ділянок гірничих виробок в чисельній моделі досягнуто шляхом дискретизації області моделювання рівномірною сіткою 210×190 розрахункових блоків з кроком 20×20 м.

У вертикальному перерізі чисельна модель представлена 9-ти шаровою товщею, яка складається з покривних мезокайнозойських (розрахункові шари 1–3) та кам'яновугільних відкладень (розрахункові шари 4–9).

За умови загальної здренованості вуглевмісної товщі і наявності в межах основної покрівлі вугільного пласта c_{10}^B обводнених пісковиків потужністю 9,0–15,2 м в товщі слабопроникних аргілітів і алевролітів (потужність міжпластя 50–55 м), гідродинамічна схема представлена областю фільтрації із забезпеченим живленням на бокових контурах моделі, заданих у межах обводненої порідної товщі граничною умовою третього роду. Відповідно до прийнятої схеми внутрішніми гідродинамічними границями моделі є контури дренажу на ділянках відпрацьованих і діючих гірничих виробок, які також задані граничною умовою третього роду (див. рис. 2).

Значення розрахункових гідродинамічних параметрів – коефіцієнта фільтрації, гравітаційної і пружної водовіддачі, які прийняті до розрахунку і уточнені в процесі вирішення обернених задач, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові гідродинамічні параметри чисельної моделі

Розрахунковий шар	Гідродинамічні параметри		
	Коефіцієнт фільтрації, $K_x = K_y / K_z$, м/добу	Коефіцієнт гравітаційної водовіддачі, μ , дол. од.	Коефіцієнт пружної водовіддачі, μ^* , дол. од.
Шари 1,2,3 – Відкладення палеоген-неогенового (P-N) і четвертинного (Q) комплексу – піски і суглинки	0,1–5,0 / 0,01–5,0	0,02–0,15	10^{-5} – 10^{-3}
Шар 4 – Слабопроникні відкладення покрівлі вугільного пласта c_{10}^B (C_1^3) – алевроліти й аргіліти	0,02 / 0,002	0,02	10^{-5}
Шар 5 – Водопроникні пісковики основної покрівлі вугільного пласта c_{10}^B ($C_{10}^B SC_{II}$)	0,04–0,4 / 0,04–0,4	0,02–0,1	10^{-5}
Шар 6 – Слабопроникні аргіліти безпосередньої покрівлі вугільного пласта c_{10}^B (C_1^3)	0,01–0,1 / 0,005–0,01	0,02–0,1	10^{-5}
Шар 7 – Вугільний пласт c_{10}^B (C_1^3)	0,07–0,7 / 0,07–0,7	0,02–0,1	10^{-5}
Шар 8 – Слабопроникні аргіліти безпосередньої підшви вугільного пласта c_{10}^B (C_1^3)	0,01–0,1 / 0,005–0,01	0,02–0,1	10^{-5}
Шар 9 – Слабопроникні відкладення підшви вугільного пласта c_{10}^B (C_1^3) – алевроліти й аргіліти	0,02 / 0,002	0,02	10^{-5}

Ідентифікація геофільтраційної моделі ділянки досліджень виконана за результатами вирішення обернених (епігнозних) задач. Для цього використані дані щодо рівневого режиму на ділянці відпрацьованих і затоплених виїмкових стовпів, а також дані щодо водопритоків до розкривних і експлуатаційних виробок на періоди відпрацювання вугільного пласта c_{10}^B .

За результати розрахунків формування водопритоків відбувається переважно за рахунок статичних запасів обводненої вуглевмісної товщі і притоку через шар пісковиків в покрівлі вугільного пласта (табл. 2).

Таблиця 2

Балансові складові водопритоків до дренажного і вентиляційного штреків по пласту c_{10}^B за даними вирішення обернених задач, $m^3/добу$

Складові балансу	Дренажний штрек	Вентиляційний штрек
Переток через покрівлю	54,1	168,3
Переток через підшву	18,2	51,7
Приток по пласту (c_{10}^B)	18,2	56,3
Всього	90,5	276,3

Величини водопритоків до дренажного і вентиляційного штреків, отримані за даними вирішення обернених задач, узгоджуються з фактичними даними, наданими геологічною службою шахти «Дніпровська». Фактичні водопритоки до розкривних виробок складають 5 та 10 $m^3/год$ відповідно для дренажного і вентиляційного штреків. За даними епігнозного моделювання (див. табл. 2) розрахункові величини водопритоків до цих штреків складають відповідно 3,8 $m^3/год$ (90,5 $m^3/добу$) і 11,5 $m^3/год$ (276,3 $m^3/добу$), сумарний водоприток до виробок – 15,3 $m^3/год$ (366,8 $m^3/добу$).

Прогнозна оцінка рівневого режиму досліджуваної ділянки і динаміки водопритоків до розкривних і експлуатаційних виробок виконана у відповідності до визначеного хронологічного графіку їх проведення. На моделі дотримання визначеного графіку забезпечується покрововим завданням на відповідні періоди часу в межах розрахункового шару 7 (вугільний пласт c_{10}^B) контурів дренажу згідно з просторовим положенням проєктованих штреків.

В характерних для досліджуваної ділянки умовах протягом всього планованого часу проведення розкривних виробок відзначається зростання сумарних величин водопритоків, яке більш інтенсивно відбувається для дренажного штреку – від 3,8 до 20,9 $m^3/год$ у порівнянні з вентиляційним – від 11,5 до 14,9 $m^3/год$ (рис. 3).

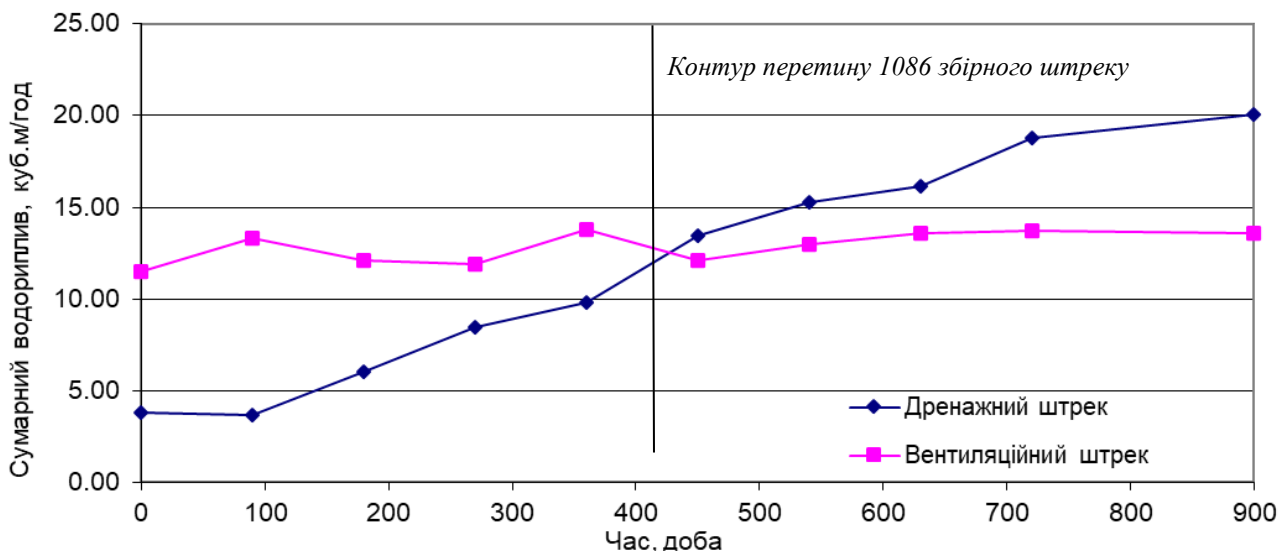


Рис. 3. Динаміка сумарних водоприпусків за часом їх проведення, пласт c_{10}^B

За умови перетину контуром дренажного штреку затопленого простору 1086 лави важливо відзначити зміни рівневого режиму у розрахункових шарах. Так, при підвищеній гідравлічній проникності (на один-два порядки) відпрацьованого простору і порушених гірничими роботами шарів аргіліту і пісковіку основної покрівлі динаміка рівневого режиму характеризується зниженням рівня води у шарі пісковіку безпосередньо над проектованим дренажним штреком (рис. 4).

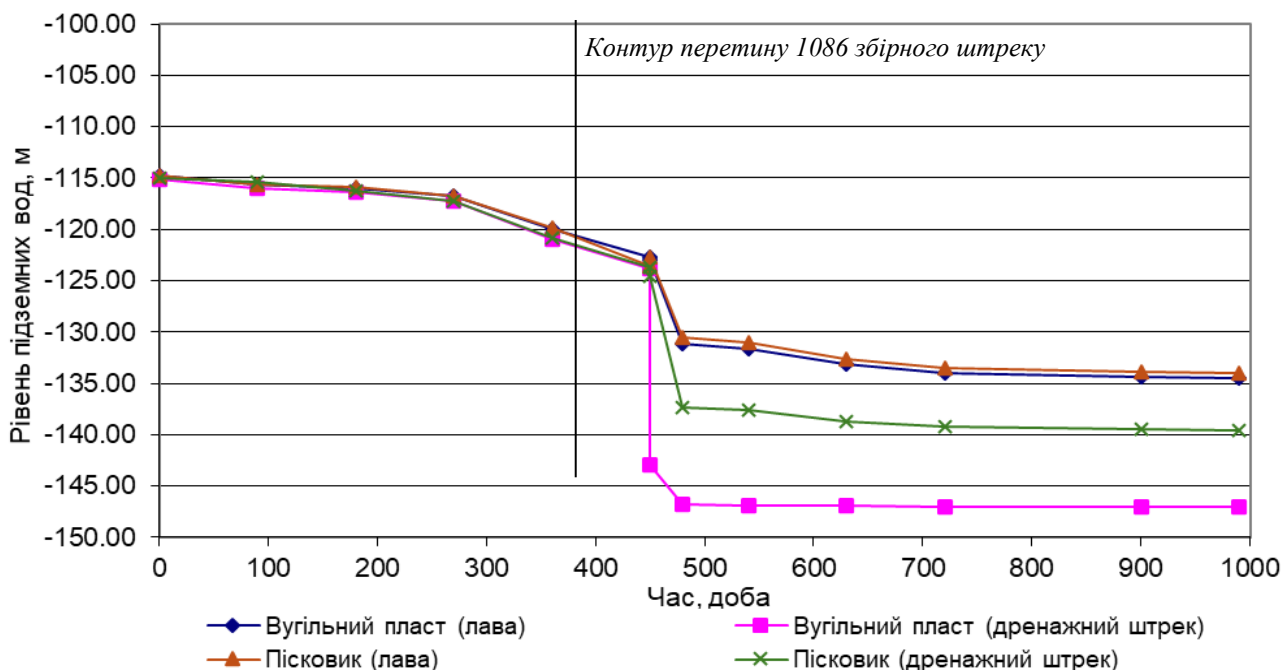


Рис. 4. Динаміка рівневого режиму підземних вод на ділянці перетину сполучення розрізної печі і 1086 збірного штреку, пласт c_{10}^B

Умовно миттєве розкриття порушеного профілю супроводжується різким зростання питомого водоприпуску, що майже на порядок перевищує його сталу

величину. Для 20-ти метрового інтервалу дренажного штреку на контурі 1086 лави розрахункова величина водопритоку відповідно складає 3,4 м³/год. Зниження «пікового» водопритоку відбувається протягом 6...12 годин.

Величина прогнозного водопритоку до проекрованої 1004 лави (див. рис. 2) зростає від 28,6 м³/год на початок відпрацювання вугільного пласта до 48,6 м³/год (на розрахунковий період 90 діб), знижуючись на кінцевий термін відпрацювання до 45,6 м³/год. Отримані величини водопритоків відповідають умові наявності на західному контурі поля шахти «Самарська» границі із забезпеченим живленням і витриманого шару пісковиків в покрівлі вугільного пласта с₁₀^В.

Виконана оцінка впливу відпрацювання проекрованої 1004 лави показала, що формування нового контуру дренажу не призведе до суттєвого зниження водопритоків до проектованих штреків.

Напружено-деформований стан породного масиву в зоні впливу затоплених виробок залежить від властивостей і ступеня порушеності порід, які визначають їх фільтраційну проникність і відповідно величини водопритоків. Тому сумісне вирішення гідродинамічних і геомеханічних задач оцінки гідрогеомеханічного стану при проведенні гірничих виробок в умовах поза межних деформацій виконано із застосуванням профільної моделі ділянки шахтного поля в середовищі програмного комплексу Phase2 [15–18]. При цьому використані результати чисельного моделювання планово-просторової фільтрації щодо формування поля напорів навколо відпрацьованих і затоплених виробок.

Оцінка геомеханічного стану вуглепородного масиву на ділянці проведення дренажного і вентиляційного штреків виконана для перерізу, проведеного вздовж затопленого 1086 збірного штреку 1086 лави (рис. 5, 6).

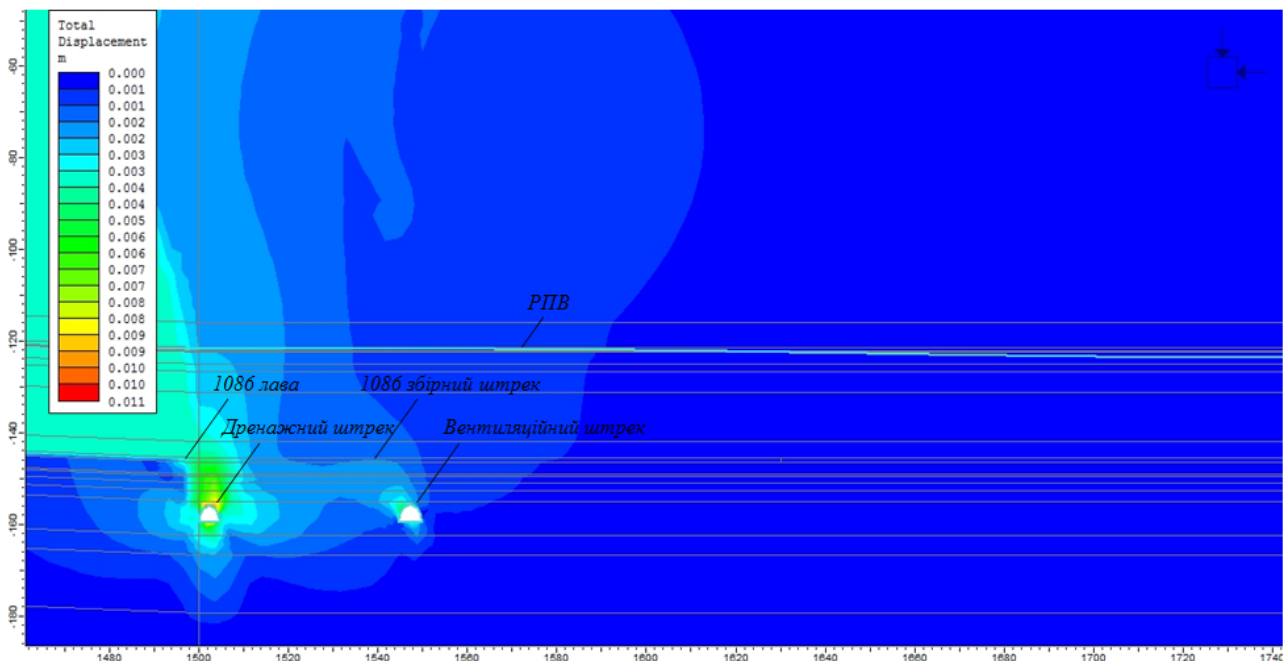


Рис. 5. Прогнозні деформації (переміщення) в гірському масиві на ділянці перетину 1086 затопленого штреку розкривними виробками за варіантом 1

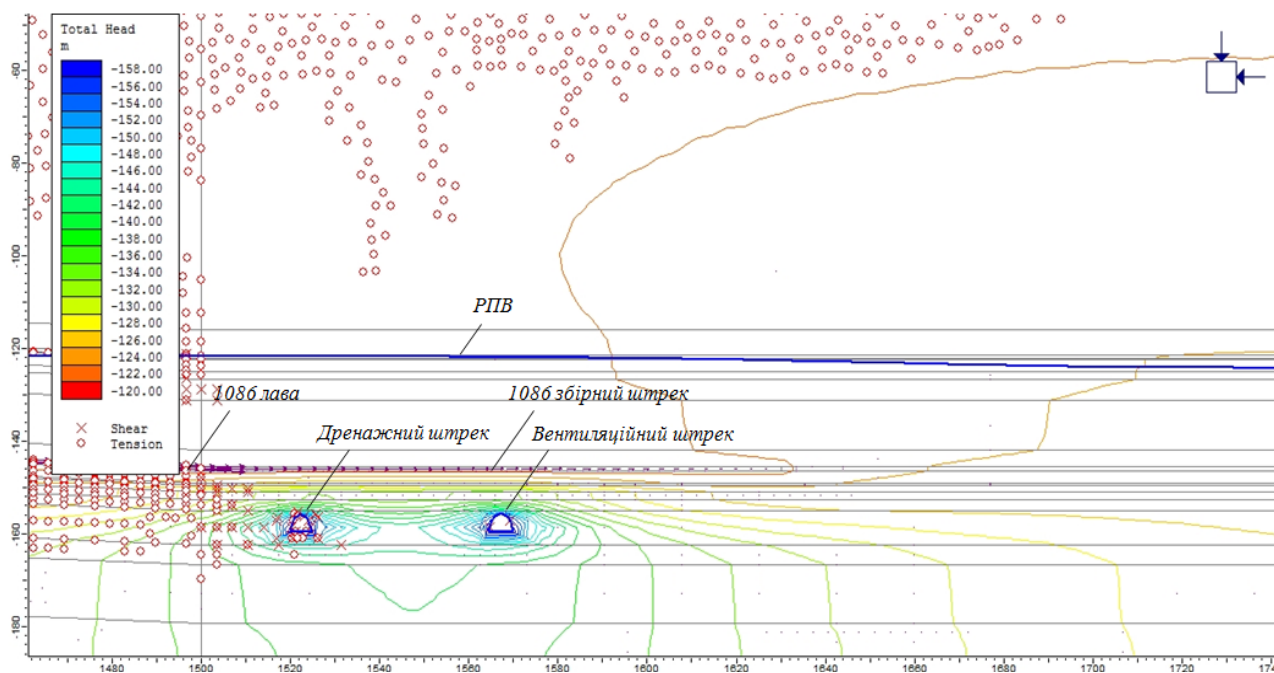


Рис. 6. Прогнозний гідродинамічний профіль ділянки перетину 1086 збірного штреку дренажним і вентиляційним штреками за варіантом 1: o x – деформації зрушення масиву; — – ізолінії рівнів (напорів) підземних вод

Напружено-деформований і гідродинамічний стан порушеного породного масиву оцінений для різних технічно можливих варіантів проведення дренажного і вентиляційного штреків по пласту c_{10}^B . Варіанти розташування розкривних виробок відносно затоплених визначаються гірничо-геологічними умовами їх проведення і враховують гідрогеомеханічний стан погашених виробок. Контролюючими параметрами при цьому є величини переміщень, деформацій та напружень для різних варіантів просторового положення розкривних виробок.

За результатами варіантних розрахунків і аналізу даних встановлено наступне.

Варіант 1 – розкривні виробки проводяться нижче 1086 збірного штреку при потужності міжпласта 8,0 м. Дренажний штрек знаходиться в межах зони тріщинного розуцільнення на контурі 1086 лави і 1086 збірного штреку, що сприяє формуванню підвищеного водопритоку. На водоприток до вентиляційного штреку впливає затоплений простір 1086 збірного штреку (див. рис. 5). Питомі водоприток до дренажного і вентиляційного штреків становлять відповідно 0,22 і 0,23 м³/год. Вплив зони тріщинного розуцільнення визначає підвищену конвергенцію порід на контурі дренажного штреку – сумарні переміщення контуру виробки складають від 0,003 м до 0,010 м.

Варіант 2 – виробки розташовуються вище 1086 збірного штреку при потужності міжпласта 3,5 м в пісковиках (за межами зони тріщинного розуцільнення). Величини водопритоків до виробок визначаються підвищеною гідравлічною провідністю шару пісковику, а питомі їх величини складають 0,24

і 0,23 м³/год, відповідно для дренажного і вентиляційного штреків. Величини переміщень контуру виробок знаходяться в межах 0,001–0,002 м.

Варіант 3 – дренажний і вентиляційний штреки проходять нижче 1086 збірного штреку поза контуром бар'єрного цілика. В цих умовах розрахункові водопритокі не перевищують відповідно 0,156 і 0,111 м³/год, а переміщення контурів гірничих виробок знаходять в межах 0,001–0,002 м.

За варіантом 4 розкривні виробки проводяться нижче 1086 збірного штреку (потужність міжпластя 8,0 м) на відстані 20 м від контуру 1086 лави. За цих умов забезпечується положення поза межами контуру тріщинного розуцільнення (див. рис. 6) і відповідно зменшення питомих водопритоків до 0,22 і 0,23 м³/год. Величини конвергенції контуру виробки також зменшуються до 0,003–0,01 м порівняно з розрахунками за *варіантом 1*.

Аналогічні тенденції підтверджено результатами розрахунків за *варіантами 5 і 6* при віддаленні дренажного штреку від контуру лави на відстань, відповідно, 30 і 40 м.

Висновки. Домінуючий вплив у формуванні водопритоків до проектних виробок в зоні впливу затопленої ділянки шахтного поля мають пісковики основної покрівлі вугільного пласту. Окрім шару пісковиків на гідродинамічний стан породного масиву впливає 1086 збірний штрек, який за умови підвищеної гідравлічної проникності виконує роль контуру забезпеченого живлення, що виражається у збереженні гідравлічних напорів над проєктованими дренажним і вентиляційним штреками.

Залучення в зону позамежного деформування проєктованого дренажного штреку відбувається при його розташуванні на відстані менше ніж 20,0 м від контуру 1086 лави, а вихід за межі зони деформацій зрушень – при віддаленні дренажного штреку від контуру затопленої лави на відстань до 30,0 м. За гідрогеомеханічним станом породного масиву варіант, де проєктні виробки проводяться на відстані 20 м контуру затоплення, є найбільш оптимальним.

Зважаючи на те, що геотехнічна ситуація визначається значною кількістю вірогідних характеристик (властивості порід, показники водопритоків, межа затоплення і терміни її формування, точність відображення геологічної будови ділянки), а також найбільш суттєвим впливом на гідрогеомеханічний стан масиву структурно-текстурної будови порід навколо ділянки збірного штреку, необхідно виконати технологічні заходи до перетину його осі з проєктними штреками пласта під захистом гідродинамічної депресії.

Представлена робота проведена в рамках досліджень щодо використання альтернативних ресурсів підземних вод (номери держреєстрації 0123U101745 та 0124U000798) та за підтримки ВСП ШУ «Дніпровське» ПрАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля»».

Перелік посилань

1. Vladyko, O., Kononenko, M., & Khomenko, O. (2012). Imitating modeling stability of mine workings. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 147–150. <https://doi.org/10.1201/b13157-26>

2. Babets, D.V., Sdvyzhkova, O.O., Larionov, M.H., Tereshchuk, R.M. (2017). Estimation of rock mass stability based on probability approach and rating systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 58–64
3. Bondarenko, V., Kovalevs'ka, I., & Fomychov, V. (2012). Features of carrying out experiment using finite-element method at multivariate calculation of mine massif – combined support system. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 7–13. <https://doi.org/10.1201/b13157-3>
4. Bazaluk, O., Rysbekov, K., Nurpeisova, M., Lozynskiy, V., Kyrgyzbayeva, G., & Turumbetov, T. (2022). Integrated monitoring for the rock mass state during large-scale subsoil development. *Frontiers in Environmental Science*, (10), 852591. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.852591>
5. Sudakov, A., Dreus, A., Kuzin, Y., Sudakova, D., Ratov, B. & Khomenko, O. (2019) A thermo-mechanical technology of borehole wall isolation using a thermoplastic composite material. *E3S Web of Conferences 109 00098 Essays of Mining Science and Practice*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900098>
6. Chudyk, I.I., Femiak, Ya.M., Orynychak, M.I., Sudakov, A.K. & Riznychuk, A.I. (2021). New methods of preventing crumbling and collapse of the borehole walls *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 17–22. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/017>
7. Педченко, С.В. (2013) Обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів стійкості бар'єрних ціликів при затопленні вугільних шахт Донбасу. *Кременчук: Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського: Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*, 1/2013(78), 80–84.
8. Sadovenko, I., Zagrytsenko, A., Podvigina, O., & Dereviagina, N. (2016). Assessment of environmental and technical risks in the process of mining on the basis of numerical simulation of geofiltration *Mining of Mineral Deposits*, 10(1), 37–43. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.01.037>
9. Zahrytsenko, A., Podvigina, O., & Dereviagina, N. (2018) Scientific and methodological foundations to develop numerical hydrodynamical models of mine fields in Donbas. *E3S Web of Conferences*, 60, 00034 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000034>
10. Sadovenko, I., Tymoshchuk, V., Zahrytsenko, A., Rodríguez, F., Sherstiuk, Y., Vlasov, V., & Chushkina, I. (2024). Hydrotechnical and ecological principles of water resources management for a mined-out mine field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012069>
11. Tymoshchuk, V., Sherstiuk, Y., Niedbalski, Z., & Morozova, T. (2017). Modeling the drainage facilities operation at the prospective construction site on the Dnipro floodland. *Mining Of Mineral Deposits*, 11(2), 34–40 <https://doi.org/10.15407/mining11.02.034>
12. Sadovenko, I., Rudakov, D., Zahrytsenko, A., & Dereviagina, N. (2020). Optimization of environmental engineering protection and water resource use at the most watered mine in Ukraine. *Resource-saving technologies of raw-material base development in mineral mining and processing*, 501–513. <https://doi.org/10.31713/m931>
13. Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. *Techniques and Methods*. <https://doi.org/10.3133/tm6a55>
14. United States Geological Survey, 2022. MODFLOW-6 – Description of Input and Output (Version 6.4.1). United States Geological Survey, Water and Science Availability and Use Science Program, MODFLOW 6 Development Team. Dec 2022. PMWIN (Processing Modflow for Windows) help, <http://www.pmwin.net/index.htm>
15. Pivnyak, G., Dychkovskiy, R., Bobyliov, O., Cabana, E. C., & Smoliński, A. (2018). Mathematical and Geomechanical Model in Physical and Chemical Processes of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 1–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.1>
16. Duncan, J.M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, April, 307–316.
17. Kinzelbach, W. (1986). *Groundwater modeling*. Amsterdam: Elsevier.

18. McDonald, M.G., & Harbaugh, A.W. (1984). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr83875>

ABSTRACT

Purpose. To assess the storage capacity of the mined out and flooded section of the mine field for hydrogeomechanical risk determination, prevention of water inflow emergencies and substantiation the engineering protection measures in influence zone of the water body.

The methods. Predictive calculations were performed using the methods of numerical mathematical modeling of hydrodynamic and geomechanical processes implemented by the method of finite differences and finite elements. Simulation technique involves the solution of a series of inverse problems, which allows us to obtain high reliability forecasts in conditions of multi-factorial influence and uncertainty of the rock massif state.

Findings. The sandstones of the main roof of the coal seam have a dominant influence on the water influx formation into designed workings within the influence zone of flooded section of the mine field. Flooded mine workings due to increased hydraulic permeability play the role of a recharge contour, which appears as keeping the hydraulic pressures over the designed galleries. Involvement of the designed workings into post-ultimate deformation zone occurs when their distance from the flooded contour is less than 20.0 m, going beyond the zone of shear deformations – when moving away to a distance of 30.0 m. According to the hydrogeomechanical condition of the rock massif, the calculation option, where the designed workings are placed at a distance of 20 m from the flooding contour, is the most optimal. Since the geotechnical situation is determined by a significant number of probable characteristics (properties of rocks, water influx rates, the boundary and timing of flooding, the mapping accuracy of the geological structure of the site), as well as the substantive influence of rock structural and textural characteristics around flooded workings, technological measures of mining under protection of hydrodynamic depression have been developed.

The originality. The regularities of the water balance formation within the area affected by the flooded workings, and the dependence of the geomechanical parameters of massif stability on the state of the excavated space, pressure values, and the barrier pillar dimensions were found.

Practical implementation. Parameters of barrier pillar, which allow minimize hydrogeomechanical risks and mineral deposit loss are substantiated. Recommendations concerning mining operation procedure around flooded workings under protection of hydrodynamic depression are given.

Keywords: *flooded mine workings, geofiltration, hydrogeomechanical state, mathematical modeling, water influx protection measures.*