

УДК 622.831:838.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.190>

## ОЦІНКА ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНИХ РИЗИКІВ ВЕДЕННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ В ЗОНІ ВПЛИВУ ЗАТОПЛЕНИХ ВИРОБОК

<sup>1</sup>Садовенко І.О., <sup>1</sup>Тимощук В.І., <sup>1</sup>Загриценко А.М., <sup>1</sup>Дерев'ягіна Н.І.<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## ОЦЕНКА ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РИСКОВ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЗАТОПЛЕННЫХ ВЫРАБОТОК

<sup>1</sup>Садовенко И.А., <sup>1</sup>Тимощук В.И., <sup>1</sup>Загриценко А.Н., <sup>1</sup>Дерев'ягина Н.И.<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

## EVALUATION OF HYDROGEOMECHANICAL RISKS FOR MINING OPERATIONS IN THE AREA OF INFLUENCE OF FLOOR OPERATIONS

<sup>1</sup>Sadovenko I.A., <sup>1</sup>Tymoshchuk V.I., <sup>1</sup>Zahrytsenko A.N., <sup>1</sup>Dereviahina N.I.<sup>1</sup>National Technical University "Dnipro Polytechnic"

**Анотація.** Визначення оптимального розміру цілика в зоні впливу затоплених виробок, що забезпечує, з одного боку, безпеку ведення гірничих робіт, а з іншого – повноту виїмки корисної копалини, залишається актуальним питанням, тому в роботі обґрунтовані його параметри з урахуванням зміни фільтраційно-ємнісних і геомеханічних властивостей гірського масиву в часі.

Використано чисельне моделювання процесів нестационарної фільтрації в кінцевих різницях для визначення прогнозних водопритоків в виробку, що знаходиться в зоні впливу відпрацьованих і затоплених ділянок. Оцінка напружено-деформованого стану порід бар'єрного цілика в зоні впливу затоплених виробок виконана на профільній моделі ділянки шахтного поля, де використані результати рішень задач планової фільтрації з формування поля напорів навколо гірничих виробок (на прикладі гірничо-технічної ситуації шахти «Добропільська» ВСП «ШУ Добропільське»).

Встановлено, що відпрацьоване і затоплене поле очисних виробок має тривалий дренажний вплив на вуглепородний масив, створюючи знижені значення напорів в межах відпрацьованих ділянок, а параметри проникності завалених порід наближаються до природних значень в процесі їх гравітаційного ущільнення протягом 25 років. При розмірах цілика шириною 20 і 5 метрів водоприток з боку затопленого поля мають другорядне значення і становлять 8...17 % від загального об'єму дренажу виробкою, що проектується. При цьому ризики прориву води існують з розшарованих зон покрівлі зближеного вугільного пласта, де в інтервалі породного міжпласта на сполученні підготовчих виробок формуються зони найбільш інтенсивного тріщинного розпушення. Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану при різному положенні виробок пластів  $l_3$  і  $l_2^1$  показує, що положення найбільш інтенсивного тріщинного розпушення в інтервалі породного міжпласта характеризується 10...15 метровою зоною під ділянкою сполучення.

Розроблено та впроваджено рекомендації щодо визначення оптимального розміру цілика в зоні впливу затоплених виробок, що забезпечує, з одного боку, безпеку ведення гірничих робіт, а з іншого - повноту виїмки корисної копалини. Ризики прориву води з розшарованих зон покрівлі зближеного вугільного пласта мінімізуються шляхом підготовки і відпрацювання діагональних лав з нормативним ухилом для водовідведення.

**Ключові слова:** гідрогеомеханічні процеси, затоплення, бар'єрний цілик, моделювання, водоприток, деформації

**Вступ.** Поряд з питаннями прогнозованого і керованого гідродинамічного режиму закриття і затоплення вугільних шахт [1-3], а також використання їх альтернативного гідроресурсу [4-6] актуальними залишаються питання ведення гірничих робіт в зоні впливу затоплених виробок, які контролюються галузевими нормативними документами. Згідно з Інструкцією з безпечного ведення гірничих робіт біля затоплених виробок (НПАОП 10.0-5.27-84) в Україні застосовуються два способи забезпечення безпеки від проривів води. Перший передбачає залишення бар'єрного цілика між затопленими і проведеними виробками, а другий - спуск води із затоплених виробок з використанням заходів за спеціальним проектом. Розрахунок ширини бар'єрного цілика виконується за аналітичною

залежністю, де розміри цілика визначаються потужністю пласта, що виймається, глибиною закладення 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, виконаний в роботі [7-9], показує, що розрахунки за даною методикою виконуються з не виправданим запасом надійності, що призводить до необґрунтованих втрат корисних копалин. Додатковий резерв стійкості цілика, підтверджений авторами [10] шляхом обґрунтування модифікованого критерію граничного фільтраційного тиску на бар'єрний цілик, згідно з яким нормативний механізм зсувного впливу напору води не відповідає фактичним даним, що призводить до перевищення проектних (або фактичних) розмірів цілика до десяти разів.

Питання визначення оптимального розміру цілика в зоні впливу затоплених виробок, що забезпечує, з одного боку, безпеку ведення гірничих робіт, а з іншого – повноту виїмки корисної копалини, залишається актуальним і вимагає обґрунтування його параметрів з урахуванням зміни фільтраційно-ємнісних і геомеханічних властивостей гірського масиву в часі. Метою роботи є мінімізація гідрогеомеханічних ризиків ведення гірничих робіт в зоні впливу затоплених виробок на прикладі гірничо-технічної ситуації шахти «Добропільська» ВСП «ШУ Добропільське». У відповідності до мети вирішено завдання кількісної оцінки стійкості цілика і ризику фільтраційного прориву води на основі синтезу моделей нестационарної фільтрації в кінцевих різницях (*eman 1*) і профільної кінцево-елементної гідрогеомеханічної моделі дискретного середовища (*eman 2*).

**Експериментальна частина.** Основною невизначеністю при вирішенні гідродинамічних прогнозних задач в межах шахтного поля є фільтраційні і ємнісні параметри гірського масиву, які в природному заляганні порід змінюються по площі, а потім зазнають трансформації в часі при всіх технологічних циклах роботи вугільної шахти. Найбільш прийнятним способом встановити закономірності їх зміни є рішення обернених задач в процесі створення планової фільтраційної моделі шахтного поля.

*Eman 1.* Для визначення прогнозних водопритоків в виробку, що знаходиться в зоні впливу відпрацьованих і затоплених ділянок, створена чисельна геофільтраційна модель ділянки шахтного поля, реалізована методом кінцевих різниць з використанням програмного комплексу MODFLOW. Модель тривимірного потоку підземних вод в пористому середовищі описується диференціальним рівнянням

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

де  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$  і  $k_{zz}$  – фільтраційна водопровідність в напрямку координатних осей  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ;

$h$  – шукана функція напору;

$t$  – час;

$W$  – одинична витрата потоку: для вхідного потоку  $W > 0$ , для вихідного

потоків –  $W < 0$ ;

$S_s$  – питома ємність пористого середовища.

Рівняння (1) разом з граничними і початковими умовами описує тривимірний нестационарний потік підземних вод в гетерогенному і анізотропному середовищі за умови, що основні напрями векторів фільтраційних провідностей збігаються з напрямками координатних осей.

При вирішенні рівняння (1) методом кінцевих різниць проводиться дискретизація області фільтрації прямокутною сіткою на окремі осередки. У межах кожного осередку існує одна точка, яка називається вузловою, і для якої обчислюється значення напору. Нумерація розрахункових шарів у вертикальному розрізі проводиться зверху вниз.

Рівняння в кінцевих різницях для осередку області фільтрації має вигляд:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & + P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k} (DEL R_j \cdot DEL C_i \cdot THICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}},
 \end{aligned} \tag{2}$$

де  $h_{i,j,k}^m$  – напір в осередку  $i, j, k$  на часовому кроці  $m$ ;

$CV$ ,  $CR$  і  $CC$  – провідності на інтервалі між вузлом  $i, j, k$  і сусіднім вузлом;

$P_{i,j,k}$  – сума коефіцієнтів при напорі, що визначають витрати притоку-відтоку в осередку;

$Q_{i,j,k}$  – сумарні значення витрат притоку-відтоку:  $Q_{i,j,k} > 0$  – приток,  $Q_{i,j,k} < 0$  – відток;

$SS_{i,j,k}$  – питома ємність;

$DEL R_j$  – ширина осередку  $j$ -ої колонки у всіх рядах;

$DEL C_i$  – ширина осередку  $i$ -го ряду у всіх колонках;

$THICK_{i,j,k}$  – вертикальна товщина осередку  $i, j, k$ ;

$t^m$  – час на часовому кроці  $m$ .

Ділянка досліджень розміром  $2000 \times 2500$  м апроксимована в плані прямокутною сіткою з кроком  $50 \times 50$  м і відображає гідродинамічну і гірничо-технічну ситуацію у південній ухильній частині зближених пластів  $l_3$  і  $l_2^I$  на горизонті 450 м шахти «Добропільська».

У кожній вузловій точці сітки відображені гіпсометрія пластів, фільтраційні та ємнісні параметри водоносних горизонтів і розділяючих товщ (табл. 1, табл. 2), початкове положення рівня підземних вод.

Таблиця 1 – Початкові значення фільтраційних параметрів моделі

Коефіцієнт фільтрації ( $K_f$ ), [м/добу] гірських порід (% склад товщі)				
Вапняк (1 %)	Пісковик (18 %)	Вугілля (2 %)	Аргіліт і алевроліт (79 %)	Середньозважений за осями $X$ та $Y$ , в дужках за $-Z$
1	18	2,0	79	
Вугленосна товща, глибина від підшови покривних відкладень 50 - 150 м				
0,25-2,0	0,3	0,3	0,005	0,077 (0,006)
Вугленосна товща, глибина від підшови покривних відкладень 150 - 300 м				
0,20-0,75	0,1	0,1	0,003	0,028 (0,004)
Вугленосна товща, глибина від підшови покривних відкладень 300 - 500 м				
0,2	0,04	0,07	0,002	0,011 (0,0025)
Вугленосна товща, глибина від підшови покривних відкладень більше 500 м				
-				0,007 (0,0013)

Відповідно до геологічної будови і гідрогеологічних умов область фільтрації в вертикальному розрізі схематизована 11-ма розрахунковими шарами, які включають водоносні горизонти і слабопроникні шари (рис. 1):

- шар 1 – водоносний горизонт неоген-четвертинних відкладень;
- шар 2 – усереднена товща з перешаруванням аргілітів і алевролітів, пісковиків, вапняків, вугілля в відсотковому співвідношенні 79:18:1:2;
- шари 3, 5 – водоносні пісковики;
- шар 4 – слабопроникна аргіліт-алевролітова товща;
- шари 6, 9 – слабопроникні пласти аргілітів;
- шари 7, 10 – водопроникні вугільні пласти  $l_3$  і  $l_2^1$ , відповідно;
- шари 8, 11 – слабопроникні пласти алевролітів.

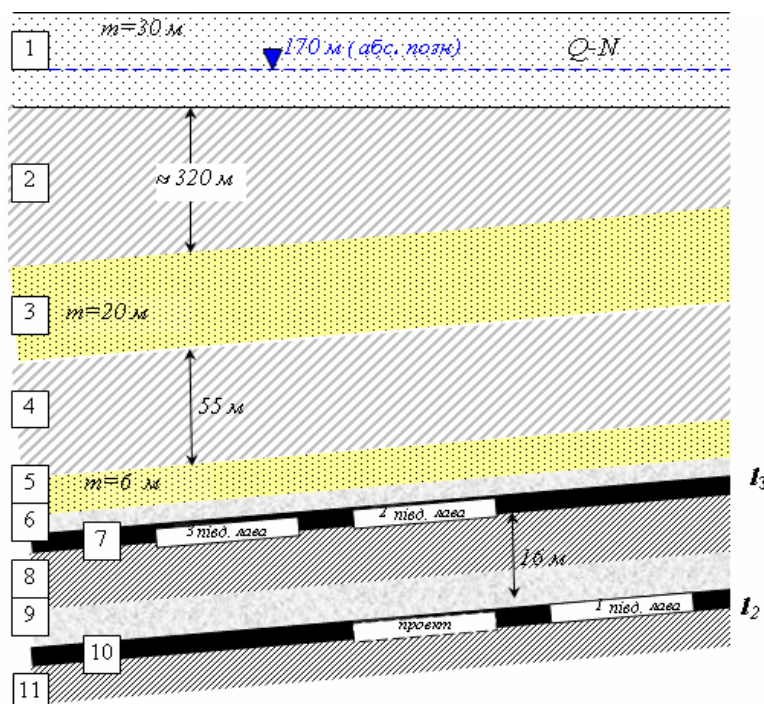


Рисунок 1 – Схематичний розріз товщі, що моделюється

Таблиця 2 – Початкові значення ємнісних параметрів моделі [%]

Розрахункові шари	Гравітаційна ємність	Пружна ємність
Покривна товща (1 розрахунковий шар)	20	0,1
Кам'яновугільна товща (2...11 розрахункові шари)	0,1	$8 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-3}$

Зовнішні гідродинамічні границі першого розрахункового шару неоген-четвертинних відкладень задані граничною умовою третього роду з забезпеченим живленням ( $H = \text{const}$ ), що відображає загальний характер живлення і розвантаження потоку підземних вод на досліджуваній площі. Величини напорів на контурі моделі прийняті відповідно до встановлених розвідувальним бурінням відміткам рівнів води і змінюються в діапазоні 147...178 м. Середня потужність водоносного шару становить 10 м.

Граничні умови карбонової товщі (розрахункові шари 2..11) однотипні, і на північній межі задані у вигляді віддаленої границі третього роду ( $H = \text{const}$ ), що характеризує вихід відкладень під покривну товщу з величинами напорів 162...178 м.

Водопровідності на зовнішніх контурах розрахункових шарів визначено, виходячи з усереднених значень їх фільтраційних характеристик в межах модельованої області.

Внутрішні границі моделі – це гірничі виробки пластів  $l_3$  і  $l_2^1$ , які є контуром дренажу ( $H = \text{const}$ ) з відомим (заданим) зниженням рівня підземних вод на позначці підосви вугільних пластів (розрахункові шари 7 і 10).

Представлена схема моделі дозволяє врахувати гідравлічний зв'язок вугленосної товщі карбону і покривних відкладень, а також оцінити порушений режим підземних вод відпрацьованої і запланованої до відпрацювання частини шахтного поля.

Постановка задачі полягає в оцінці водного балансу на локальній ділянці шахтного поля, де гідродинамічна ситуація визначається умовами відпрацювання зближених (18...22 м) вугільних пластів в зоні впливу затоплених виробок.

Пласт  $l_3$  в південній частині відпрацьовувався в період 1959-1992 рр. У 2017-2018 роках відпрацьована 3-тя південна лава (рис. 1) з залишенням цілика шириною до 37 м біля затоплених гірничих виробок 2-ї південної лави (1991-1993 роки відпрацювання). При відпрацюванні лави в таких умовах водопрояви фіксувалися лише з покрівлі пласта на окремих ділянках у вигляді капежу.

Південна частина пласта  $l_2$  відпрацьовувалася в період з 1969 по 1990 роки, а 1-а південна лава на горизонті 450 м відпрацьована 1989-1990 рр. з водопроявами до  $1,0 \text{ м}^3/\text{год}$  у вигляді капежу і струменів. З 2005 року конвеєрний штрек ізольований, очисні і підготовчі виробки затоплені, а доступ до них відсутній. На період до 2005 року на даній ділянці шахтного поля фіксувався водоприток з витратою до  $20 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Станом на серпень 2018 року до водозбірнику флангового ухилу надходить приток води з південного боку пласта  $l_2^1$  –  $15 \text{ м}^3/\text{год}$  і  $7 \text{ м}^3/\text{год}$  – з пласта  $l_3$ .

Описана фактична гідродинамічна ситуація відтворена на моделі з метою її ідентифікації і встановлення ємнісних і фільтраційних параметрів порушеного гірничими роботами масиву. Контури відпрацьованих лав задані у вигляді дрен з розрахунковою провідністю породного масиву  $10 \text{ м}^2/\text{доб}$ , що відповідає величині фільтраційної проникності  $0,004 \text{ м}/\text{добу}$ .

За результатами розв'язання обернених задач нев'язка балансу геофільтраційної моделі не перевищує  $1,48 \text{ м}^3/\text{доб}$ , а відносна похибка  $0,02\%$ . Розбіжність величин модельних і фактичних водопритоків до  $4,6 \text{ м}^3/\text{доб}$ .

Модель ідентифікована до реальних умов з параметрами водопровідності для відпрацьованого простору лав  $0,08 \dots 0,1 \text{ м}^2/\text{доб}$ , гравітаційної ємності завалених порід  $\mu = 0,3$  і величиною пружної водовіддачі  $\mu^* = 10^{-5}$ .

Рішення епігнозних задач дозволило встановити наступні закономірності порушеного гірничими роботами породного масиву:

1) відпрацьовані раніше в межах південного ухилу 1-а і 2-а південні лави по пластах  $l_2^1$  і  $l_3$ , продовжують мати дренальний вплив на вуглепородний масив, створюючи знижені значення напорів в межах відпрацьованих ділянок гор. 450 м;

2) величини напорів в межах затопленої зони (7...13 м) формують водоприток  $20 \dots 30 \text{ м}^3/\text{год}$  і визначаються особливостями водовідведення в умовах похилого залягання вугільних пластів. При цьому формується локальний підпір на гіпсометрично знижених ділянках виїмкових стовпів;

3) фільтраційні параметри порушених гірських порід в межах відпрацьованих ділянок шахтного поля характеризуються близькими до природних значень, що пояснюється їх гравітаційним ущільненням протягом 25...29 років з моменту відпрацювання 1-ї і 2-ї південних лав пластів  $l_2^1$  і  $l_3$ .

Прогнозне моделювання передбачало кількісну оцінку величин водопритоків до 2-ї південної лави при наявності і відсутності бар'єрного цілика в зоні впливу затоплених виробок пласта  $l_2^1$ . Розрахунки виконані в нестационарному режимі фільтрації при середній величині посування забою  $100 \text{ м}$  в місяць, а їх результати наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Прогнозні величини водопритоків

Розрахунковий період, діб	Загальний приток за пластами $l_2^1$ і $l_3$ , ( $\text{м}^3/\text{год}$ )	Водоприток до 2-ї південної лави пласта $l_2^1$ , ( $\text{м}^3/\text{год}$ )			
		загальний приток до лави		в тому числі з боку відпрацьованого і затопленого поля	
		з ціликом	без цілика	з ціликом	без цілика
30	37,23...36,41	3,72	2,88	0,65	0,39
60	38,72...37,30	6,21	4,74	0,69	0,45
90	39,57...37,77	7,91	6,02	0,73	0,51
120	40,04...37,98	9,10	6,94	0,76	0,56
150	40,25...38,03	9,96	7,60	0,80	0,62
180	40,31...37,98	10,62	8,12	0,84	0,68
210	40,28...37,88	11,16	8,57	0,89	0,75
240	40,16...37,72	11,65	8,98	0,94	0,82
270	39,88...37,51	12,27	9,54	1,01	0,90
300	40,03...37,88	14,07	11,18	1,16	1,03

Формування прогнозних водопритоків до виробки при наявності бар'єрного цілика відбувається переважно за рахунок ємнісних запасів покрівлі вугільного пласта і частково (від 8 до 17%) – притоку через бар'єрний цілик. Відповідно, притоки води до запроєктованої лави змінюються протягом всього періоду ведення очисних робіт (10 місяців) від 3,72 до 14,07 м<sup>3</sup>/год при наявності бар'єрного цілика і від 2,88 до 11,18 м<sup>3</sup>/год – при його відсутності (підготовчий штрек проведено «в присічку» аналогічно 1-ій південній лаві). При цьому притоки з боку відпрацьованого виймального стовпа для розглянутих варіантів становлять відповідно 0,65...1,16 і 0,39...1,03 м<sup>3</sup>/год.

Знижені величини прогнозних водопритоків з боку затопленої лави при відсутності бар'єрного цілика пояснюються низькими значеннями гідравлічних напорів, що формуються на контурі відпрацьованої лави під впливом діючого водовідливу і особливостей похилого залягання вугільного пласта.

*Етап 2.* Напружено-деформований стан порід бар'єрного (або охоронного) цілика в зоні впливу затоплених виробок залежить від розмірів цілика, властивостей породного масиву і визначає його фільтраційну проникність, а відповідно і величини водопритоків. Тому комплексне рішення задач з оцінки його гідрогеомеханічного стану при експлуатації в умовах поза межних деформацій виконано на профільній моделі ділянки шахтного поля, де використані результати рішень задач планової фільтрації з формування поля напорів навколо гірничих виробок.

Основне диференціальне рівняння профільної фільтрації, що використовується в кінцево-елементному формулюванні програмного комплексу PHASE2, має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

де  $H$  – гідравлічний напір;

$k_x$  і  $k_y$  – гідравлічні (фільтраційні) провідності в напрямку координатних осей  $X$  і  $Y$ ;

$Q$  – витрата потоку на границі;

$t$  – час;

$m_w$  – коефіцієнт зміни ємності;

$\gamma_w$  – питома вага води.

Застосовуючи метод зважених нев'язок Гальоркіна до диференціальних рівнянь (3) отримують звичайно-елементний вираз для опису двовимірної фільтрації у вигляді

$$\tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \{H\} + \tau \int_A (\lambda < N >^T < N >) dA \{H\}, \quad t = q\tau \int_L (< N >^T) dL \quad (4)$$

де  $[B]$  – матриця градієнтів;

$[C]$  – матриця гідравлічних (фільтраційних) провідностей елементів;

$\{H\}$  – вектор вузлових напорів;

$< N >$  – вектор інтерполяційних функцій;

$q$  – одинична витрата через контур елемента;

$\tau$  – товщина елемента;

$t$  – час;

$\lambda$  – ємнісний параметр для нестационарної фільтрації, що дорівнює  $m_w \gamma_w$ ;

$A$  – позначення для підсумовування за площею елемента;

$L$  – позначення для підсумовування за контуром елемента.

У скороченій формі рівняння фільтрації для кінцевих елементів має вигляд

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\}, \quad (5)$$

де  $[K]$  – матриця властивостей елемента;

$[M]$  – матриця мас елемента;

$\{Q\}$  – вектор витрати потоку в елементі.

Оцінка геомеханічного стану вуглепородного масиву на ділянці запроектованого відпрацювання лави виконана для характерного перетину, проведеного перпендикулярно простяганню виїмкових стовпів (рис. 1).

Очисна виробка моделювалася відомим рівнем деформування порід виробленого простору з коефіцієнтом розпушення безпосередньої покрівлі 1,2.

Прогнозне моделювання напружено-деформованого стану порушеного породного масиву виконано для умов відпрацювання лави з шириною цілика 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10 і 5 м з боку затопленої виробки.

При оцінці водопритоків, що формуються з боку затоплених виробок, прийняті умови відсутності або обмеженого водовідливу на контурі виробки і високою фільтраційною проникністю порід виробленого простору (до 1 м/с).

Напружено-деформований стан захисного цілика при відпрацюванні лави контролювався величинами переміщень, деформацій і напружень в породному масиві при наближенні контуру до виробленого простору. Також враховувався вплив розподілу гідравлічних напорів, значення яких отримані на етапі вирішення профільних гідродинамічних задач при різній ширині бар'єрного цілика.

Характер позамежного деформування вуглепородної товщі при ширині бар'єрного цілика 35, 20 і 5 метрів наведено на рис. 2. Залучення в зону позамежного деформування порід навколо бар'єрного цілика відбувається в покрівлі в інтервалі 45...65 м відпрацьованого вугільного пласта. Формування в межах цих інтервалів зон підвищеної тріщинуватості сприяє зняттю гідравлічних напорів з боку затопленого конвеєрного штреку.

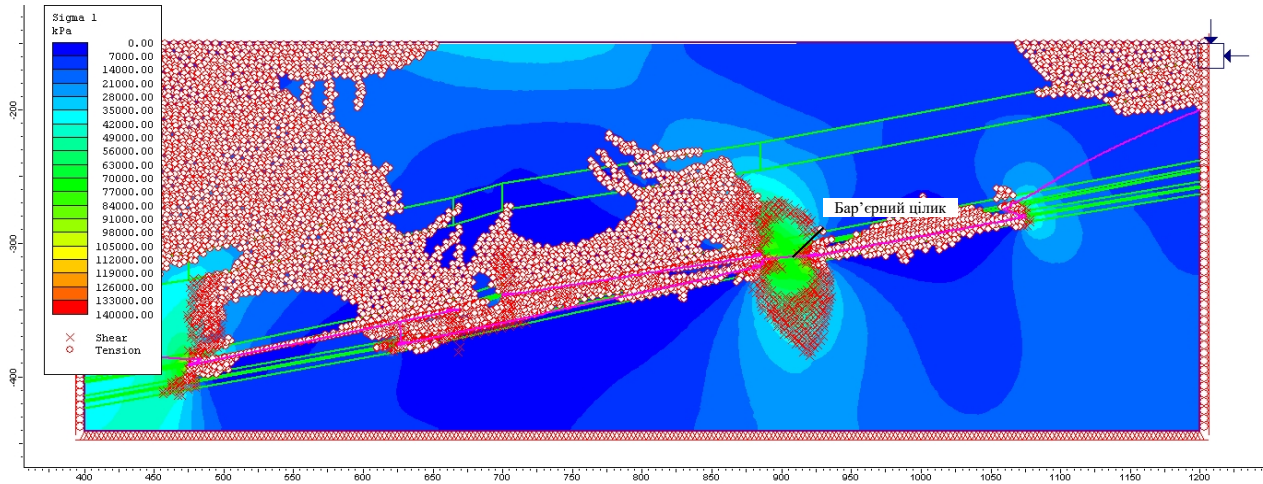
Безпосередньо в межах бар'єрного цілика розвиток зон позамежних деформацій спостерігається в крайових ділянках вугільного пласта на глибину до 10,0 м, а змикання цих зон відбувається при ширині цілика менше 20,0 м. Тобто розвиток зон позамежного деформування і пов'язане з ним збільшення проникності бар'єрного цілика відбувається при ширині менше 20,0 м.

Вплив зон позамежного деформування на процеси фільтрації через бар'єрний цілик в чисельній моделі оцінено шляхом збільшення фільтраційної проникності вугільного пласта від двох до десяти разів в порівнянні з проникністю природному заляганні [11-12].

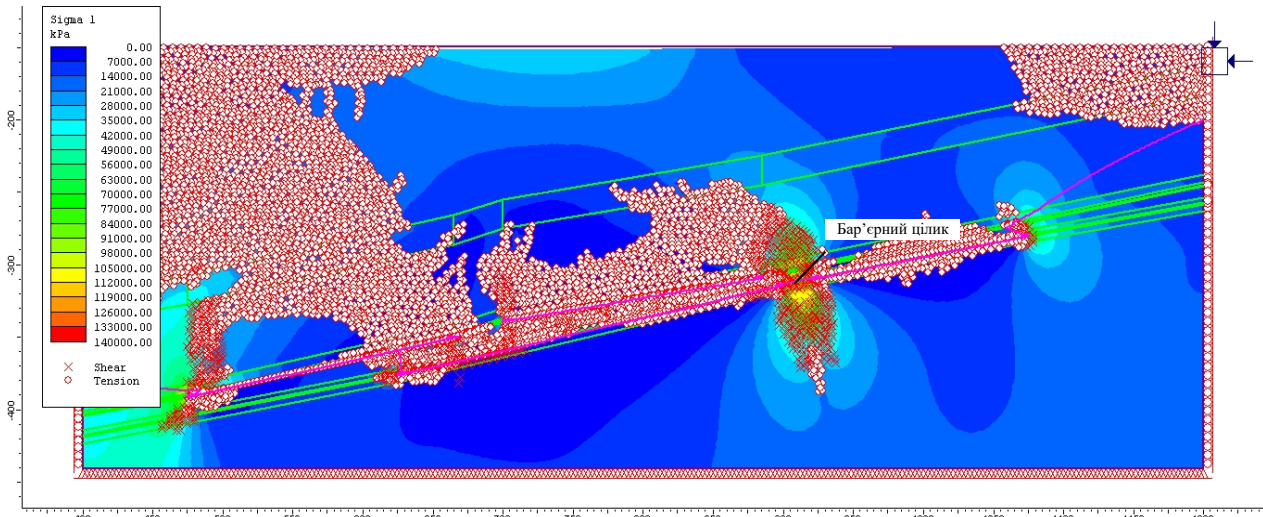
Результати розрахунків водопритоків, що формуються через бар'єрний цілик при різних значеннях його проникності (коефіцієнт фільтрації 0,07, 0,14, 0,7 м/доб) наведені на рис. 3.



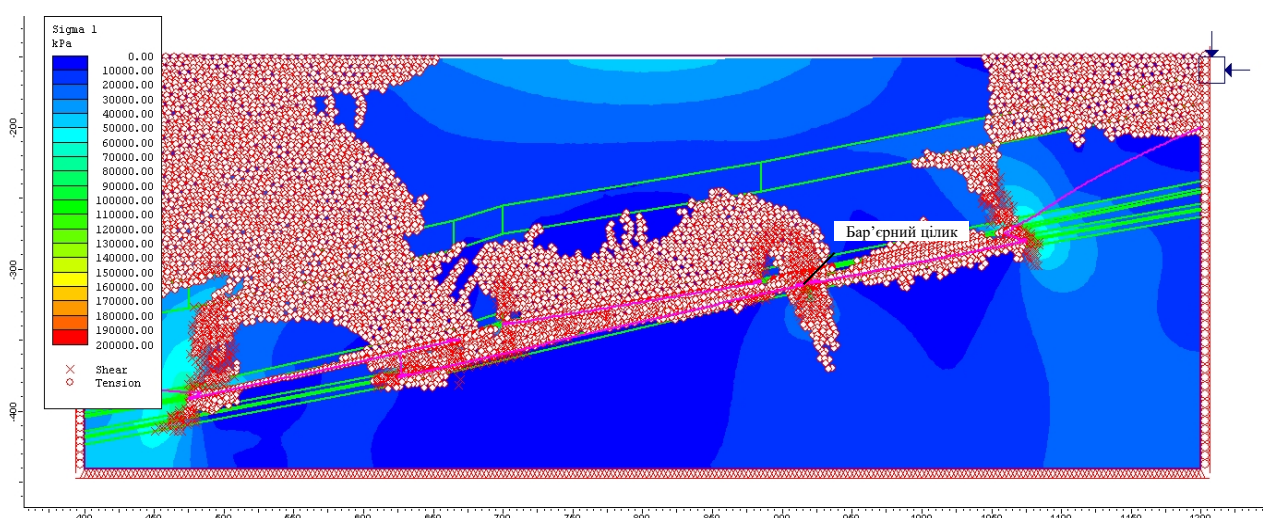
Необхідно відзначити, що при максимальній проникності бар'єрного цілика і зменшенні його ширини (рис. 3), не відзначається істотного приросту водопритоків.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Формування зон позамежного деформування вуглепородної товщі при ширині бар'єрного цілика 35 (а), 20 (б) і 5 (в) метрів

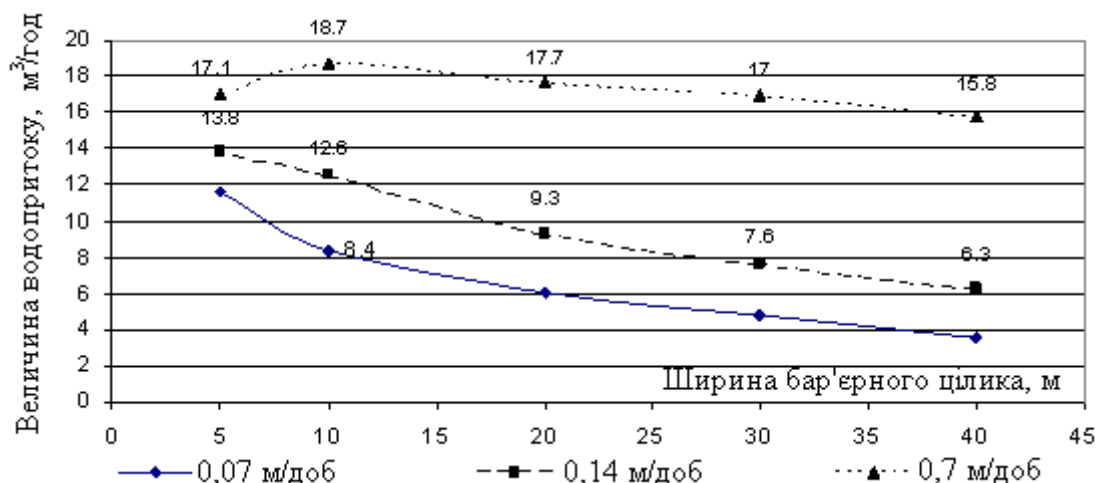


Рисунок 3 – Формування прогнозних водопритоків при різній ширині і проникності бар'єрного цілика

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану при різному положенні виробок пластів  $l_3$  і  $l_2^1$  показує, що положення найбільш інтенсивного тріщинного розпушення в інтервалі породного міжпласта характеризується 10...15 метровою зоною під ділянкою сполучення.

При встановленому впливі границі сполучення 1-ї і 2-ї південних лав пласта  $l_3$  на характер деформування порід міжпласта однією з умов зниження водопритоків, що формуються, є розташування проектного вентиляційного штреку поза контуром ділянки інтенсивного тріщинного розпушення. Це може бути досягнуто шляхом підготовки та відпрацювання діагональної лави, що забезпечує вільний відтік води.

**Висновки і рекомендації.** При суміщенні моделі нестационарної фільтрації в кінцевих різницях і профільної кінцево-елементної гідрогеомеханічної моделі дискретного середовища встановлено, що відпрацьоване і затоплене поле очисних виробок має тривалий дренальний вплив на вуглепородний масив, створюючи знижені значення напорів в межах відпрацьованих ділянок, а параметри проникності зрушених порід наближаються до природних значень в процесі їх гравітаційного ущільнення протягом 25 років. При розмірах цілика шириною 20 і 5 метрів водопритокі з боку затопленого поля мають підлегле значення і становлять 8...17 % від загального притоку води в лаву. При цьому ризики прориву води існують з розшарованих зон покрівлі зближеного вугільного пласта, де в інтервалі породного міжпласта на сполученні підготовчих виробок формуються зони найбільш інтенсивного тріщинного розпушення. Ці ризики можна зменшити шляхом підготовки і відпрацювання діагональних лав з нормативним ухилом для водовідведення.

**Подяка.** Дослідження виконані за фінансової підтримки компанії «ДТЕК Добропіллявугілля» та ВСП «Шахтоуправління Добропільське». Автори вдячні компанії за сприяння в проведенні досліджень і впровадження рекомендацій щодо безпечного відпрацювання виробки в зоні впливу затоплених виробок.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sadovenko I., Zahrytsenko A., Podvigina O., Dereviahina N. & Brzeźniak S. Methodical and Applied Aspects of Hydrodynamic Modeling of Options of Mining Operation Curtailment. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 277. P. 36-43.

- DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.36>
2. Hrinov V.G., Khorolskiy A.A. Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment. *E3S Web of Conferences: Ukrainian School of Mining Engineering*. 2018. Vol. 60. P. 1-10.  
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
  3. Loredó C., Roqueñí N., Ordóñez A. Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use. *International Journal of Coal Geology*. 2016. Vol. 164. P. 115-122.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
  4. Sadovenko I., Inkin O., Zagrytsenko A. Theoretical and geotechnological fundamentals for the development of natural and man-made resources of coal deposits. *Mining of mineral deposits*. 2016. No. 10 (4). P. 1-10.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.001>
  5. Falshtynskyy V., Dychkovskyy R., Lozynskyy V. & Saik P. New method for justification the technological parameters of coal gasification in the test setting. *Geomechanical Processes During Underground Mining*. 2012. P. 201-208.  
DOI: <https://doi.org/10.1201/b13157-35>
  6. Goerke-Mallet P., Drobniowski M. Planning long-term mine-water management for the Ibbenbüren coal basin. *XV International ISM Congress, Aachen (International Society for Mine Surveying)*, 2013. P. 319-324.
  7. Педченко С.В., Шиптенко А.В. Опыт ведения горных работ у затопленных выработок. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2011. № 9, Ч. 1. С. 80-88.
  8. Vervoort A., Declercq P.-Y. Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of underground workings. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018. 28(1). P. 53-59.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.008>
  9. Садовенко І.А., Демченко Ю.І., Улицкий О.А. Оценка геомеханической устойчивости междушахтных целиков. *Сб. научн. тр. НГУ*. 2003. Т.1, № 17. С. 40-43.
  10. Napa-García G.F. & Navarro Torres. Applicability of failure strain for the stability evaluation of square pillars in room and pillar mining. *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017. P. 557-565.  
DOI: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1710\\_45\\_Napa-Garcia](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_45_Napa-Garcia)
  11. Gao W. & Mingming G. Stability of a coal pillar for strip mining based on an elastic-plastic analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2016. 87. P. 23-28.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.05.009>
  12. Sadovenko I.A., Prokopenko T.D., Yuzhakova R.A. & Tishkov V.V. Modeling permeability of grouting mixture. *Naukovy Visnyk NGU*. 2007. 3. P. 8-11.
  13. Khorolskiy A., Hrinov V., Mamaikin O., Demchenko Y. Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. 13(4). P. 53-62.  
DOI: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
  14. Ermakov V.N., Semenov A.P., Ulitskiy O.A. Development of processes of flooding of the earth's surface under the influence of the closing mines. *Ugol Ukrainy*. 2001. No. 6. P. 12-13.
  15. Barnett B., Townley L., Post V., Evans R. et al. Australian groundwater modeling guidelines. *Waterlines Report Series*. 2012. 82. P. 204.
  16. Otto C. & Kempka T. Prediction of Steam Jacket Dynamics and Water Balances in Underground Coal. *Gasification Energies*. 2017. 10(6). P. 739.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en10060739>

## REFERENCES

1. Sadovenko, I., Zahrytsenko, A., Podvigina, O., Dereviahina, N. and Brzeźniak, S. (2018), "Methodical and Applied Aspects of Hydrodynamic Modeling of Options of Mining Operation Curtailment", *Solid State Phenomena*, vol. 277, pp. 36-43.  
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.36>
2. Hrinov, V.G. and Khorolskiy, A.A. (2018), "Improving the process of coal extraction based on the parameter optimization of mining equipment", *E3S Web of Conferences: Ukrainian School of Mining Engineering*, vol. 60. pp. 1-10.  
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017>
3. Loredó, C., Roqueñí, N. and Ordóñez, A. (2016), "Modelling flow and heat transfer in flooded mines for geothermal energy use", *International Journal of Coal Geology*, vol. 164, pp. 115-122.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.04.013>
4. Sadovenko, I., Inkin, O. and Zagrytsenko, A. (2016), "Theoretical and geotechnological fundamentals for the development of natural and man-made resources of coal deposits", *Mining of mineral deposits*, no. 10 (4), pp. 1-10.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/mining10.04.001>
5. Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V. and Saik, P. (2012), "New method for justification the technological parameters of coal gasification in the test setting", *Geomechanical Processes During Underground Mining*, pp. 201-208.  
DOI: <https://doi.org/10.1201/b13157-35>
6. Goerke-Mallet, P. and Drobniowski, M. (2013), "Planning long-term mine-water management for the Ibbenbüren coal basin", *XV International ISM Congress, Aachen (International Society for Mine Surveying)*, pp. 319-324.
7. Pedchenko, S.V. and Shiptenko, A.V. (2011), "Mining practices in the neighbourhood of the flooded mine workings", *Tractates of UkrDIMGRMMS of NAS of Ukraine*, no. 9 (1), pp. 80-88.
8. Vervoort, A. and Declercq, P.-Y. (2018), "Upward surface movement above deep coal mines after closure and flooding of

- underground workings”, *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 28(1), pp. 53-59.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.008>
9. Sadovenko, I.A., Demchenko, Yu.I. and Ulitski, O.A. (2003), “Evaluation of geomechanical stability of intermine pillars”, *Collection of scientific papers of NMU*, no. 1(17), pp. 40-43.
  10. Napa-García, G.F. and Navarro Torres (2017), “Applicability of failure strain for the stability evaluation of square pillars in room and pillar mining”, *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, pp. 557-565.  
DOI: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1710\\_45\\_Napa-Garcia](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1710_45_Napa-Garcia)
  11. Gao, W. and Mingming, G. (2016), “Stability of a coal pillar for strip mining based on an elastic-plastic analysis”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 87, pp. 23-28.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.05.009>
  12. Sadovenko, I.A., Prokopenko, T.D., Yuzhakova, R.A. and Tishkov, V.V. (2007), “Modeling permeability of grouting mixture”, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 3, pp. 8-11.
  13. Khorolskyi, A., Hrinov, V., Mamaikin, O. and Demchenko, Y. (2019), “Models and methods to make decisions while mining production scheduling”, *Mining of Mineral Deposits*, vol. 13(4), pp. 53-62.  
DOI: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
  14. Ermakov, V.N., Semenov, A.P. and Ulitskiy, O.A. (2001), “Development of processes of flooding of the earth’s surface under the influence of the closing mines”, *Ugol Ukrainy*, no. 6, pp. 12-13.
  15. Barnett, B., Townley, L., Post, V., Evans, R. et al. (2012), “Australian groundwater modeling guidelines”, *Waterlines Report Series*, 82, pp. 204.
  16. Otto, C. and Kempka, T. (2017), “Prediction of Steam Jacket Dynamics and Water Balances in Underground Coal”, *Gasification Energies*, no. 10(6), pp. 739.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/en10060739>

### Про авторів

**Садovenko Іван Олександрович**, д.т.н., професор, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), м. Дніпро, Україна, [gig\\_nmu@i.ua](mailto:gig_nmu@i.ua)

**Тимошук Василь Іполітович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), м. Дніпро, Україна, [gig\\_nmu@i.ua](mailto:gig_nmu@i.ua)

**Загриценко Аліна Миколаївна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), м. Дніпро, Україна, [alinanik@bigmir.net](mailto:alinanik@bigmir.net)

**Деревагіна Наталія Іванівна**, кандидат технічних наук, доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП»), м. Дніпро, Україна, [natali.derev@gmail.com](mailto:natali.derev@gmail.com)

### About the authors

**Sadovenko Ivan Oleksandrovych**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, Ukraine, [gig\\_nmu@i.ua](mailto:gig_nmu@i.ua)

**Tymoshchuk Vasyil Ipolitovych**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, Ukraine, [gig\\_nmu@i.ua](mailto:gig_nmu@i.ua)

**Zahrytsenko Alina Mykolaivna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, Ukraine, [alinanik@bigmir.net](mailto:alinanik@bigmir.net)

**Dereviahina Nataliia Ivanivna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University “Dnipro Polytechnic”, Dnipro, Ukraine, [natali.derev@gmail.com](mailto:natali.derev@gmail.com)

**Abstract.** Justification of rational parameters of a barrier safety pillar using an example of real mining and technical situation near the flooded 1st southern stope of the seam  $l_2^1$  of the southern slope of the Dobropilska mine of Industrial-Structural Enterprise “Colliery Group Dobropilske” for safe development of ventilation drift of the adjacent 2nd southern stope of the seam  $l_2^1$ . Numerical modelling of processes of non-stationary filtration in finite differences for determining predicted water inflows into the working, which is in the influence zone of developed and flooded areas. Estimation of a stress-strain state of rocks of the barrier (or safety) pillar in the influence zone of flooded workings is performed using the profile model of a mine field area, where the solution results of problems of planned filtration on forming a field of pressures around mine workings are used.

It is established that the developed and flooded field of stopes has a lasting draining influence on coal-waste rock massif, while creating lowered values of pressures within the developed areas. In addition, permeability parameters of collapsed rocks approach the natural values in a process of their gravitational densification for 25 years. For sizes of a safety pillar with width of 20 and 5 meters water inflows from the side of the flooded field have a secondary value and are 8...17 % of the total drainage of a new stope under design. During this, the risks of water influx from stratified zones of a roof of contiguous coal seams are present, where zones of the most intense crack loosening are formed in the interval of rock interlayer at joints of preparatory workings.

Parameters of safety pillar stability and risk of filtration water influx considering the changes of filtration, capacity, and geomechanical properties of a rock massif in time are qualitatively estimated for the first time. The estimation is based

on a synthesis of models of non-stationary filtration in finite differences and profile finite-element hydrogeomechanical model of discrete medium.

Recommendations on determining the optimal size of a safety pillar in an influence zone of flooded workings are developed and introduced in production. The safety pillar ensures the safety of mining operations on the one hand and the completeness of coal extraction on the other one. Risks of water influx from stratified zones of a roof of contiguous coal seam can be minimized through preparation and development of diagonal stopes with a standard slope for water drainage.

**Keywords:** hydrogeomechanical processes, flooding, barrier safety pillar, modelling, water inflow, deformations

**Аннотация.** Определение оптимального размера целика в зоне влияния затопленных выработок, обеспечивает, с одной стороны, безопасность ведения горных работ, а с другой – полноту выемки полезного ископаемого, и остаётся актуальным вопросом, поэтому в работе обоснованы его параметры с учётом изменения фильтрационно-ёмкостных и геомеханических свойств горного массива во времени.

Использовано численное моделирование процессов нестационарной фильтрации в конечных разностях для определения прогнозных водопритоков в выработку, находящуюся в зоне влияния отработанных и затопленных участков. Оценка напряженно-деформированного состояния пород барьерного (или охранного) целика в зоне влияния затопленных выработок выполнена на профильной модели участка шахтного поля, где использованы результаты решений задач плановой фильтрации по формированию поля напоров вокруг горных выработок (на примере горно-технической ситуации шахты «Добропольская» ОСП «ШУ Добропольское»).

Установлено, что отработанное и затопленное поле очистных выработок оказывает длительное дренирующее влияние на углепородный массив, создавая пониженные значения напоров в пределах отработанных участков, а параметры проницаемости обрушенных пород приближаются к природным значениям в процессе их гравитационного уплотнения в течение 25 лет. При размерах целика шириной 20 и 5 метров водопритоки со стороны затопленного поля имеют подчинённое значение и составляют 8...17 % от общего дренирования новой проектируемой лавой. При этом риски прорыва воды существуют из расслоенных зон кровли сближенного угольного пласта, где в интервале породного междупластья на сопряжении подготовительных выработок формируются зоны наиболее интенсивного трещинного разрыхления. Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния при разном положении выработок пластов  $l_3$  и  $l_2'$  показывает, что положение наиболее интенсивного трещинного разрыхления в интервале породного междупластья характеризуется 10...15 метровой зоной под участком сопряжения.

Разработаны и внедрены рекомендации по определению оптимального размера целика в зоне влияния затопленных выработок, обеспечивающего, с одной стороны, безопасность ведения горных работ, а с другой – полноту выемки полезного ископаемого. Риски прорыва воды из расслоенных зон кровли сближенного угольного пласта минимизируются путём подготовки и отработки диагональных лав с нормативным уклоном для водоотведения.

**Ключевые слова:** гидрогеомеханические процессы, затопление, барьерный целик, моделирование, водоприток, деформации

*Статья поступила в редакцию 10.02.2020*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом*