

УДК 622.5:622.841:622.847

### ОБҐРУНТУВАННЯ ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТІЙКОСТІ БАР'ЄРНИХ ЦІЛИКІВ ПРИ ЗАТОПЛЕННІ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ ДОНБАСУ

**С. В. Педченко**

Український державний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи (УкрНДМІ) НАН України  
вул. Челюскінців, 291, м. Донецьк, 83121, Україна. E-mail: ledy.sv@yandex.ua

Існуючі розробки і нормативи не достатньо враховують потенціал стійкості бар'єрних ціликів у затоплених виробок, що визначає безпеку ведення гірничих робіт на шахтах, суміжних із затоплюваними. Обґрунтований в роботі емпіричний підхід ураховує особливості геофільтрації через бічні породи і передбачає ототожнення в нормативній формулі глибини робіт з величиною гідравлічного підпору, що дозволяє точніше врахувати гідравлічну стійкість ціликів. Послідовне сполучення плоских скінчено-елементної моделі суцільного середовища і моделі дискретного середовища, а також моделі нестационарної фільтрації в скінчених різницях визначають методичний підхід, що дозволяє оцінити ступінь ризику прориву води, яка до 33 % відповідає триразовому запасу геомеханічної стійкості цілика і дозволяє використовувати результат в інженерній оцінці безпеки закриття шахт.

**Ключові слова:** цілик, стійкість, фільтраційний прорив, безпека.

### ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВОСТИ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ДОНБАССА

**С. В. Педченко**

Украинский государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела (УкрНИМИ) НАН Украины  
ул. Челюскинцев, 291, г. Донецк, 83121, Украина. E-mail: ledy.sv@yandex.ua

Существующие разработки и нормативы не достаточно учитывают потенциал устойчивости барьерных целиков вблизи затопленных выработок, который определяет безопасность ведения горных работ на шахтах, смежных с затопляемыми. Обоснованный в работе эмпирический подход учитывает особенности геофильтрации через боковые породы и предполагает отождествление в нормативной формуле глубины работ с величиной гидравлического подпора, что позволяет точнее учесть гидравлическую устойчивость целиков. Последовательное сопряжение плоских конечно-элементной модели сплошной среды и модели дискретной среды, а также модели нестационарной фильтрации в конечных разностях определяют методический подход, позволяющий оценить степень риска прорыва воды, которая до 33 % соответствует трехкратному запасу геомеханической устойчивости целика и позволяет использовать результат в инженерной оценке безопасности закрытия шахт.

**Ключевые слова:** целик, устойчивость, фильтрационный прорыв, безопасность.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Аналіз досвіду ліквідації вугільних підприємств показав, що гідрогеологічні та геомеханічні зміни в гірському масиві є визначальним чинником у прийнятті технічних рішень при закритті шахт. Це визначає необхідність розробки моделі геолого-технічного середовища, що дозволяє реально оцінювати гідрогеомеханічні зміни в гірському масиві. Загальні підходи щодо вирішення цих задач визначені у другій половині ХХ сторіччя дослідженнями вітчизняних і зарубіжних наукових шкіл [1–3].

В основу відповідних обґрунтувань і рішень технологічних задач з управління гідродинамічним режимом затоплення шахт покладено дані про затоплення шахт у воєнний період та відомості про стан бар'єрних ціликів у наступні роки. Ці дані свідчать про нерівномірність підйому рівня шахтних вод на суміжних шахтах, затухання швидкості затоплення в межах кожної з них. Якщо враховувати, що згортання гірничих робіт супроводжується частковою або повною зупинкою роботи водовідливів, то при вирішенні завдань керування гідродинамічним режимом затоплення шахт необхідно забезпечити наступне: планове відключення водовідливів на закритих шахтах; визначення критичного рівня затоплення і величин водопритоків, які не загрожують руйнуванням бар'єрних ціликів; збільшення потужності водовідливних комплексів на сусідніх шахтах, величина

якої визначається фільтраційними властивостями і стійкістю бар'єрних ціликів.

Аналіз галузевих нормативно-методичних документів дозволив встановити, що при розрахунку розмірів бар'єрних вугільних ціликів не враховуються особливості гідрогеомеханічних процесів, які супроводжують оконтурювання ціликів очисними виробками.

З огляду робіт щодо розрахунку параметрів вугільних ціликів витікає, що основним критерієм визначення стійкості цілика є дія напружень від ваги порід покрівлі. У розроблених методиках використовується межа міцності вугілля на одновісьовий стиск і не враховується збільшення міцності при об'ємному навантаженні цілика, що суперечить експериментальним даним, які свідчать про збільшення міцності масиву в декілька разів при прикладанні до зразка бокового мінімального навантаження  $0,1\sigma_{сж}$  ( $\sigma_{сж}$  – межа міцності на стиск). Оскільки вугільний цілик є об'ємним і в його основній частині діють об'ємні напруження, то при розрахунках слід вводити коефіцієнт збільшення міцності. Крім цього, жодна з існуючих методик і рекомендацій щодо визначення розмірів бар'єрних ціликів не враховує, що бар'єрний цілик може бути розташованим на значній відстані від зони ведення гірничих робіт, в неробочій частині шахтного поля (панелі, горизонту). При цьому водоприток із затопленої частини гірського

масиву може бути мінімальним. Розміри бар'єрних ціликів менші за нормативні мають невизначений запас стійкості, але зберігають свої функції. Вочевидь, у подібних випадках доцільно залишати цілики менших розмірів, так як ймовірність прояву негативних наслідків фільтрації води в вироблений простір залишається незначною.

У зв'язку з цим метою роботи є оцінка розмірів бар'єрних ціликів у залежності від ступеня ризику прориву води.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Аналіз розмірів бар'єрних ціликів показує, що у понад 20 % випадків фактичні розміри відповідають нормативним. В інших випадках (більше 75 %) фактична ширина ціликів – більше розрахункової. Таке перевищення пов'язане, як правило, з певними причинами, які можна розділити на дві основні групи:

- гірничо-геологічні умови: підвищена зольність, нестійка покрівля, розмив пласта, наявність тектонічних порушень і т.д.;

- суміщення бар'єрних ціликів з охоронними ціликами для захисту об'єктів на поверхні.

Приблизно у 25 % випадків розміри бар'єрних ціликів визначаються не за розрахунковими формулами, а встановлюються за межею стійкої покрівлі, кондиціями вугілля за зольністю, зонами впливу розривних тектонічних порушень і охоронних ціликів, потужністю вугільних пластів.

З аналізу даних про фільтрацію води через цілики зроблені наступні висновки:

- раптові прориви води в гірничі виробки супроводжуються значним виносом розмитих гірських порід, що ускладнює ліквідацію аварійних ситуацій;

- випадки проривів води через бар'єрні вугільні цілики досить рідкісні порівняно з проривами води через бокові породи цілика, особливо якщо вони представлені водопроникними пісковиками і вапняком;

- прориви води зі старих затоплених гірничих виробок відбуваються головним чином у результаті їх перетину новими виробками, крім того, аварійна ситуація змінює гідродинамічний режим підземних вод і створює в затоплених виробках додатковий напір води.

На основі отриманих висновків з аналізу фактичних даних обґрунтований [4–6] новий емпіричний підхід до оцінки ширини бар'єрних ціликів ( $d$ ), який враховує особливості геофільтрації через бічні породи і передбачає ототожнення в нормативній формулі глибини робіт з величиною гідравлічного підпору  $[\Delta H]$ , що дозволяє точніше оцінювати гідргеомеханічну стійкість ціликів:

$$d = 5M + 0,5[\Delta H] + 0,001L \quad (1)$$

де  $[\Delta H]$  – величина напору води поблизу цілика,  $m$ ;  $M$  – потужність пласта, що виймається,  $m$ ;  $L$  – сумарна довжина підземних геодолітних ходів,  $m$ .

У випадку відсутності достовірних даних про величину коефіцієнта фільтрації ( $k$ ) гірських порід визначена методика розрахунку, що враховує базові співвідношення основного закону фільтрації. Методика апробована емпірично і може бути застосована на шахтах, ліквідація яких супроводжується фільтрацією води в суміжні шахти і вимагає визначення

рівня затоплення з підвищеною точністю. Параметр  $\bar{m}$ , що характеризує фільтраційний перетин, враховує перетікання через геомеханічно порушені бокові породи, які є основним провідником води з затопленої в працюючу шахту:

$$k = 24Q_{cp}L_{cp} / \pi \Delta H B \bar{m} \quad (2)$$

де  $Q$  – витрата притоку,  $m^3/год$ ;  $L_{cp}$  – середня довжина шляху фільтрації,  $m$ ;  $\bar{m}$  – сумарна потужність водоносних горизонтів у покрівлі та підшві пласта,  $m$ ;  $B$  – ширина фронту фільтрації,  $m$ .

На глибинах понад 500–600 м відоме співвідношення  $\sigma_{сис} / \gamma H$  буде меншим за одиницю, що свідчить про нестійкий стан бар'єрного цілика.

У цьому критерії використовується показник міцності на одноосовий стиск, але в масиві діє об'ємне поле напружень. Дослідження на трьохосовому пресі, виконані А.Д. Алексєєвим [7] та ін., показують, що боковий підпір зростає збільшенню його міцності у 9–10 разів. Рівень напружень в середній частині цілика може сягати  $(1,5-2,9) \cdot \gamma H$ , що підтверджують результати математичного моделювання.

Постановчі передумови спільного врахування геомеханічних і гідродинамічних кількісних співвідношень параметрів у гірському масиві в умовах конкретного гірничотехнічного об'єкта наведені на рис. 1.

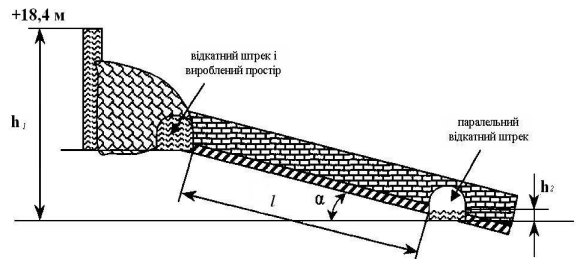


Рисунок 1 – Схематизація області фільтрації об'єкта моделювання при градієнті напору  $(h_1 - h_2)/l$

В алгоритм чисельної реалізації математичної моделі (програмний комплекс "Modflow") закладені скінчено-різницеві рішення диференційного рівняння фільтрації, що має вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

де  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$  і  $k_{zz}$  – гідравлічні провідності, відносно координат  $X$ ,  $Y$  і  $Z$ ;  $h$  – функція напору (висота стовпа води),  $W$  – одинична витрата потоку: для вхідного в розрахункову область потоку  $W > 0$ , для вихідного потоку –  $W < 0$ ,  $S_s$  – питома ємність пористого середовища,  $t$  – час.

Скінчено-різницева апроксимація рівняння (3) для розрахункового блоку області фільтрації

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

(4)

де  $h_{i,j,k}^m$  – напір в розрахунковому блоці  $i, j, k$  на часовому кроці  $m$ ,  $CV, CR, CC$  – гідравлічні провідності або провідності на інтервалі між блоком  $i, j, k$  і сусіднім блоком,  $P_{i,j,k}$  – сума коефіцієнтів з напором, що визначає витрати притоку-відтоку в блоці,  $Q_{i,j,k}$  – сумарні значення витрат притоку-відтоку у блок:  $Q_{i,j,k} > 0$  – приток,  $Q_{i,j,k} < 0$  – відтік,  $SS_{i,j,k}$  – питома ємність блоку,  $DEL R_j$  – ширина блоку  $j$ -ої колонки в усіх рядах,  $DEL R_i$  – ширина блоку  $i$ -го ряду у всіх колонках,  $THICK_{i,j,k}$  – вертикальна товщина блоку  $i, j, k, t^m$ .

Геомеханічні зміни в масиві оцінювалися за допомогою чисельного моделювання об'єкта в пружно-пластичній постановці. Напруження Мізеса є функцією різниці нормальних напружень, що пропорційні дотичним напруженням. Ці напруження відображують пластичні деформації масиву, а їх максимальні значення спостерігаються в середній частині міжлавного цілика. Еквівалентні деформації відображують найбільш проникні зони. Поле фільтрації представлено векторами інтенсивності перетоків, які реагують на граничні відмітки затоплення і кількісно показують, що перетік формується на 80 % за рахунок ресурсу підземних вод (рис. 2).

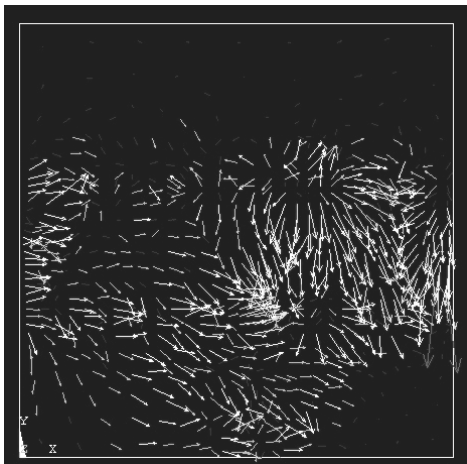


Рисунок 2 – Векторний розподіл інтенсивності потоків

Рис. 3,а ілюструє приклад розподілу інтенсивності потоків підземних вод при затопленні вентиляційного горизонту виробленого простору 15 північної і південної лав пласта  $k_8$  шахти «Курахівська». Максимальна інтенсивність потоків спостерігається в південному крилі і належить до крайової частини виробленого простору.

На рівні пласта  $k_8$  також спостерігається зона максимальної інтенсивності гідравлічних потоків, яка локалізована в крайовій частині виробленого простору з південної сторони цілика, залишеного під пластом  $k_8$ . Потoki обумовлені власними ресурсами водоносних порід і спрямовані в область мінімальних нормальних напружень.

При підвищенні рівня затоплення північного крила до позначки –400 м (рис. 3,б) спостерігається та ж сама якісна картина, однак потоки виробленого

простору пласта  $l_2$  і південного крила пласта  $k_8$  об'єднуються.

За рахунок наповнення зони розвантаження формується гідравлічний підпір. Це призводить до просочування води через зону підвищеного гірського тиску. Потoki в південному крилі (рис. 3,в) в обох пластах практично об'єднуються і їх максимум співпадає із зонами розвантаження.

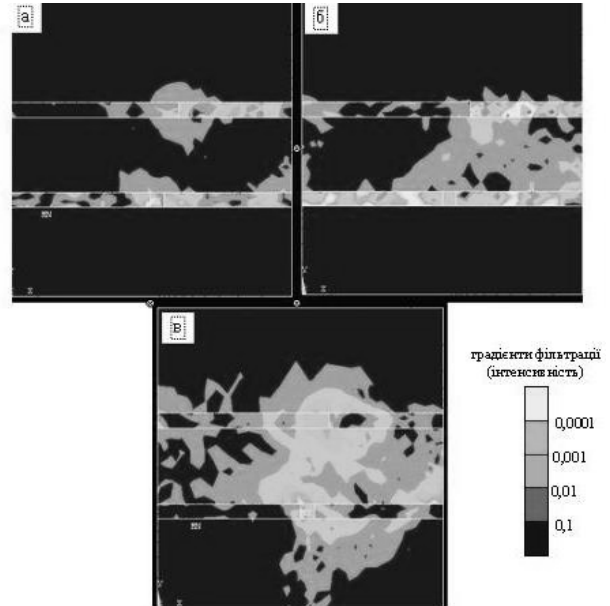


Рисунок 3 – Розподіл потоків у найбільш небезпечному перерізі при затопленні північного крила шахти «Курахівська»

Найбільш проблематичною при прийнятті інженерно-технічних рішень щодо закриття шахт є задача оцінки ризику прориву води через бар'єрні цілики і визначення його кількісно.

Геомеханічна оцінка граничних співвідношень НДС проведена на чисельній моделі (рис. 4), але для вивчення динаміки розвитку фільтраційної зони використана модель, що враховує дискретизацію масиву (модель Кюндалла) [8].



Рисунок 4 – Розподіл зон поза межних деформацій поблизу міжшахтного цілика при веденні очисних робіт (на прикладі шахти «Донецька», пласти  $l_3$  і  $l_4$ )

Виділення області фільтрації визначається особливостями тривалих зрушень товщі поблизу бар'єрного цілика і наявністю вироблених просторів. Всі основні параметри зрушень в околиці цілика обумовлені процесами, які прийнято вважати незворотними. Найбільш характерними є розвиток тріщин у

навоколишньому масиві, повзучість зруйнованих порід, обвалення завислих шарів, дроблення завалених порід і їх подальше злежування. Такі процеси раціонально описувати за допомогою методу дискретних елементів, що застосовується в практиці комп'ютерного моделювання незворотних геомеханічних процесів.

Метод моделювання кінетики обвалення заснований на моделюванні динаміки руху частинок в зернистому середовищі. Алгоритм розрахунку базується на двох фундаментальних законах фізики твердих тіл – законі Гука і другому законі Ньютона. При цьому виконується заміна реального масиву порід дискретними елементами, які переміщуються незалежно один від одного, і взаємодіють шляхом прямих зіткнень. У процесі розрахунку циклічно здійснюється послідовний перебір всіх елементів в порядку зростання їх порядкового номера, при цьому перераховуються координати  $X$ ,  $Y$ , швидкості  $V$  і діючі сили  $F$ . Найбільш важливою частиною алгоритму є визначення відстані між елементами і обчислення їх вдавнення  $\Delta l$  за рахунок деформацій.

До всіх елементів моделі докладається постійно діюче вертикальне прискорення  $H$ , що відповідає прискоренню вільного падіння. У результаті його дії елементи циклічно отримують збільшення або затування швидкості (коли напрям дії рівнодіючої сил протилежний вектору швидкості елементів), що обчислюється за формулою

$$\Delta V_y = H \Delta t \quad (5)$$

де  $\Delta V_y$  – вертикальне збільшення швидкості;  $H$  – прискорення вільного падіння;  $\Delta t$  – зміна часу за цикл.

Потім здійснюється переміщення елементів на нову позицію відповідно до сформованих швидкостей  $V$  і збільшення часу  $\Delta t$  за формулами

$$X = X + \Delta V_x \Delta t \quad (6)$$

$$Y = Y + \Delta V_y \Delta t \quad (7)$$

де  $X$ ,  $Y$  – горизонтальна і вертикальна координата положення елемента, відповідно;  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$  – горизонтальне та вертикальне прирощення швидкості.

Після переміщення всіх елементів на нові позиції виконується перевірка їх взаємодії і на підставі отриманих величин вдавнювання  $\Delta l$  елементів обчислюється збільшення діючих сил за формулою

$$\Delta F = k \Delta l, \quad (8)$$

де  $\Delta F$  – прирощення сили;  $k$  – коефіцієнт жорсткості елементів;  $\Delta l$  – суміщення елементів. Окремо обчислюються і фіксуються сили, що діють в горизонтальних і вертикальних напрямках, а також моменти сил, що викликають повороти елементів відносно власних центрів.

Щоб врахувати реальні процеси, що перебігають у породній товщі, а саме, інерційність, опір середовища і втрати енергії при переході з одного стану в інший, в алгоритм введені коефіцієнти. Зокрема є можливість задавати опір середовища, що діє на рухомі елементи, і коефіцієнт втрати енергії при взаємодії елементів. Для врахування сили тертя, що виникає при взаємодії дискретних елементів, у процесі обчислення збільшень сил враховуються зазначені у вихідних даних коефіцієнти тертя. Після визначення діючих сил усіх елементів оцінюється і

виконується відповідне переміщення елементів на нову позицію і відбувається циклічне повторення описаних операцій.

У використаному алгоритмі є можливість об'єднувати окремі елементи зв'язками, завдяки чому їх визначена кількість може взаємодіяти як єдине ціле з урахуванням міцності на розрив. У цьому випадку при обчисленні діючих сил виконується перевірка умови міцності блоку, при перевищенні якої зв'язки, що утримують елементи в блоці ліквідуються, відбувається його руйнування і елементи продовжують взаємодіяти як незалежні. Є можливість також задавати породам властивості злипання, коли окремі незв'язані елементи починають діяти як єдине ціле при зближенні їх на відстань, меншу заздалегідь заданої критичної величини.

Як особливі елементи в алгоритмі використовуються поверхні, що перешкоджають руху елементів у встановленому напрямку. Дуже важливо, що вони мають пружні властивості, притаманні дискретним елементам і дозволяють обмежувати напрямки їхнього руху та ефективно задавати граничні умови і управляти потоками. В алгоритмі використовуються не тільки нерухомі стінки, але й задаються функціями переміщення.

Тривалі зрушення враховуються шляхом зменшення меж міцності зв'язків між сусідніми елементами. Зменшення меж міцності здійснюється пропорційно ітераційним циклом, що імітують за суттю час моделювання. Формула для корекції меж міцності має наступний вигляд

$$S_{t+1} = S_t (1 - k_t N), \quad (9)$$

де  $S_{t+1}$  і  $S_t$  – межі міцності на розрив або на зрушення на наступному і попередньому циклах, відповідно;  $k_t$  – коефіцієнт пропорційності, величина якого підбирається в процесі моделювання з врахуванням вихідних даних;  $N$  – поточне число циклів розрахунку.

Зміна проникних зон в просторі і в часі за результатами моделювання призводить до руйнування бар'єрного цілика. Ступінь ризику фільтраційного прориву води визначається відношенням часу, за яке досягнута існуюча геомеханічна ситуація, до часу, що відповідає моменту об'єднання водопровідних тріщин при моделюванні і корелює з розмірами цілика:

$$C_p = 0,48 - 0,57 \left( \frac{d_{факт}}{d_n} - 0,5 \right)^{1/5}, \quad (10)$$

де  $d_{факт}$ ,  $d_n$  – відповідно фактична і нормативна ширина цілика. Дана функція має кореляцію з достовірністю 0,997, що дозволяє використовувати її при розрахунках як явну формулу.

Результати оцінки стійкості і ризику прориву цілика апробовані у 10-ти проектах закриття шахт, підтверджений економічний ефект складає 375 тис. грн. (шахта ім. Н.О. Ізотова) та 350 тис. грн. (шахти № 6 «Червона зірка» та № 9 «Капітальна»).

ВИСНОВКИ. Наявний досвід ліквідації вугільних підприємств показує, що гідрогеологічні та геомеханічні зміни в гірському масиві є визначальним чинником, який необхідно враховувати при прийнятті технічних рішень закриття шахт.

Обґрунтований емпіричний підхід до оцінки ширини бар'єрних ціликів враховує особливості геофільтрації через бокові породи і передбачає ототож-

нення в нормативній формулі глибини робіт з величиною гідравлічного підпору, що дозволяє врахувати гідравлічну стійкість ціликів.

Послідовне сполучення плоских скінчено-елементних геомеханічних моделей суцільного і дискретного середовища, а також моделі нестационарної фільтрації в скінчених різницях визначають методичний підхід, що дозволяє оцінити гідрогеомеханічні параметри бар'єрних вугільних ціликів і ступінь ризику фільтраційного прориву води: 1) фільтраційні потоки на 80 % формуються за рахунок ресурсу підземних вод між верхніми горизонтами і виробленим простором пласта; 2) ступінь ризику прориву води до 0,33 за моделювання відповідає триразовому запасу геомеханічної стійкості цілика і дозволяє знайти інженерний підхід до його визначення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гвирцман Б.Я. О необходимых размерах барьерных целиков у затопленных выработок на пологих пластах Донбасса // Вопросы горного давления, сдвижения горных пород и методики маркшейдерских работ. – Донецк: Труды ВНИМИ, 1964. – № 52.
2. Якоби О. Вывалы пород из кровли в очистных забоях с механизированной крепью и предложения по их предотвращению // Глюкауф. – 1963. – № 14. – С. 882–888.

#### JUSTIFICATION OF HYDROGEOMECHANICAL STABILITY PARAMETERS OF BARRIER PILLARS IN THE FLOODED COAL MINES OF THE DONETS COAL BASIN

S. Pedchenko

Ukrainian State Research and Design Institute of Mining Geology, Rock Mechanics and Mine Surveying, National Academy of Sciences of Ukraine (UkrNIMI, NAS of Ukraine)  
291 vul. Chelyuskintsev, 291, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: Ledy.Sv@yandex.ru

Stability resource of barrier pillars around the flooded mine workings is taken into consideration inadequately in the current developments and standards. And it is just this resource that specifies mining safety, in particular, in mines adjacent to those being flooded. The explained empirical approach takes into consideration the features of geofiltration through the wall rocks and assumes the match between work depth and hydraulic head in the normative formula. It enables the pillars' hydraulic stability to be taken into consideration more accurately. Consistent match of horizontal of the finite-element continuum model and discrete medium model as well as finite difference non-steady filtration model defines the methodological approach that makes it possible to estimate riskiness of water breakout, which matches up to 33 % of the three-fold geomechanical safety reserve of the pillar against flooding and enables the outcome to be used in the engineering evaluation of mine closure safety.

**Key words:** barrier, stability, filtration breakthrough, safety.

#### REFERENCES

1. Gvirtsman B.J. On the necessary sizes of barrier pillars near the flooded workings at flat-lying seams of the Donets Coal Basin // *Problems of rock pressure, rock subsidence displacement and mine surveying techniques*. – Donetsk: Transactions of VNIMI, 1964. – № 52. [in Russian]
2. Jacobi A. Rocks fell out of the roof in longwall with powered supports and suggestions for prevention // *Glyukauf*. – 1963. – № 14. – PP. 882–888.
3. Sinha K. Displacement Discontinuity Technique for Analyzing Stresses and Displacements Due to Mining in Seam Deposits: A thesis submitted to the faculty of the school of the University of Minnesota // In partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. – Minnesota, March 1979. – 311 p.
4. Calculation of water filtration in operating mine in the flooded mine being liquidated / P.G. Artemenko, A.V. Shiptenko, S.V. Pedchenko // *Coal of Ukraine*. – 2005. – № 11. – PP. 47–48. [in Russian]

3. Sinha K. Displacement Discontinuity Technique for Analyzing Stresses and Displacements Due to Mining in Seam Deposits: A thesis submitted to the faculty of the school of the University of Minnesota // In partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. – Minnesota, March 1979. – 311 p.

4. Расчет фильтрации воды в действующую шахту при затоплении выработок ликвидируемой шахты / П.Г. Артеменко, А.В. Шиптенко, С.В. Педченко // *Уголь Украины*. – 2005. – № 11. – С. 47–48.

5. Оценка фильтрации через разделительные междушахтные массивы при затоплении шахт / П.Г. Артеменко, Л.А. Драган, С.В. Педченко // *Уголь Украины*. – 2006. – № 10. – С. 32–33.

6. Research into criteria of geomechanical stability of barrier pillars in flooding mines / A.V. Shiptenko, P.G. Artemenko, Pedchenko S.V. // 20<sup>th</sup> World mining congress & expo 2005, 7–11 november 2005, Tehran, Iran. – “Mining and sustainable development”. – PP. 705–709.

7. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. – К.: Наукова думка, 1989. – 166 с.

8. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical Model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979a. – 29 (1). – PP. 47–65.

5. Rating filtration separation arrays between the mines with their sinking / Artemenko P.G., Dragan L.A., Pedchenko S.V. // *Coal of Ukraine*. – 2006. – № 10. – PP. 32–33. [in Russian]

6. Research into criteria of geomechanical stability of barrier pillars in flooding mines / A.V. Shiptenko, P.G. Artemenko, S.V. Pedchenko // 20<sup>th</sup> World mining congress & expo 2005, 7–11 november 2005, Tehran, Iran. – “Mining and sustainable development”. – PP. 705–709.

7. Alexeev A.D., Revva V.N., Ryazantsev N.A. *Rock failure in bulk compressive stress field*. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 166 p. [in Russian]

8. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical Model for granular assemblies // *Geotechnique*. – 1979a. – 29 (1). – PP. 47–65.

Стаття надійшла 19.02.2013.