

УДК 622.831.2:539.422.3

Л.М. Захарова, І.В. Назимко*Інститут фізики гірничих процесів НАН України***ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПІВ ГІРНИЧИХ РОБІТ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ЗАХІД З УПРАВЛІННЯ ДИСИПАТИВНИМИ СТРУКТУРАМИ НАВКОЛО ВИРОБКИ**

За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено вплив швидкості посування очисного вибію на стійкість підготовчих виробок. Показано, що підвищення швидкості посування очисного вибію є ефективним засобом для управління дисипативними структурами, які спонтанно виникають навколо підземних підготовчих виробок, що дозволяє зменшити деформації їх перерізу.

Ключові слова: гірський тиск, механіка руйнування, необоротні деформації, дисипативні структури.

Л.Н. Захарова, И.В. Назимко*Институт физики горных процессов НАН Украины***ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПОВ ГОРНЫХ РАБОТ КАК ЭФФЕКТИВНАЯ МЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИССИПАТИВНЫМИ СТРУКТУРАМИ ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ**

С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние скорости подвигания очистного забоя на устойчивость подготовительных выработок. Показано, что повышение скорости подвигания очистного забоя является эффективным средством для управления диссипативными структурами, спонтанно возникающими вокруг подземных подготовительных выработок, что позволяет уменьшить деформации их сечения.

Ключевые слова: горное давление, механика разрушения, необратимые деформации, диссипативные структуры.

L.M. Zakharova, I.V. Nazymko*Institute for Physics of Mining Processes NAS Ukraine***AUGMENTING OF RATE ADVANCE AS EFFICIENT METHOD FOR DISSIPATIVE STRUCTURE CONTROL IN VICINITY OF AN UNDERGROUND ROADWAY**

Purpose. The objective of this paper is to find the reason why convergence of an underground roadway sides or roof and floor diminishes due to augmenting of the rate of a longwall advance.

Methodology. FLAC3D computer code and actual measurements have been employed to simulate the irreversible ground movement around entry. We also used analysis of fractal characteristic of fragments from rock burst tests under different loading rates to verify our findings.

Findings. We found that dissipative structures that spontaneously arise in the adjacent to entry rock mass due to longwall movement could suppress irreversible ground movement into the entry cavity. The more the rate of the advance the better dissipative structures subdue the irreversible movement of the ground. Increase of the rate causes enlargement of the rock fragments that additionally restrains the irreversible movement of the fragments because their large dimensions detain process of accumulation of degree of freedom. Comparison of the modeling ground movement and the displacements of the roof and sides of the experimental roadway as well as floor's heave has demonstrated good agreement that is in 78% coherence.

Originality. We clarified the issue concerning the reason of ground displacement into roadway cavity due to augmenting the longwall rate advance. Both enlargement of the rock fragments and growth of the dissipative structure sizes cause jamming effect, what impedes further displacement of the rock fragment into roadway cavity.

Practical implications. New findings could assist practitioners to control of ground in hard geologic and technical environment, where underground coal seams are extracted.

Keywords: ground control, irreversible ground movement, dissipative structures, longwalls, rate of advance.

Вступ. Забезпечення стійкості підготовчих виробок є важливою задачею, актуальність якої неухильно зростає зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин. Надійність процесу видобутку підземних корисних копалин перш за все залежить від стійкості підготовчих виробок, через які здійснюється доступ до корисних мінералів, транспортування, вентиляція, підтримання безпечного рівня гірничих робіт.

Існує декілька принципово різних технологій, які сприяють збереженню та навіть збільшенню стійкості підземних підготовчих виробок [1]. Найбільш популярний напрямок, яким слідує виробничники, пов'язаний з вдосконаленням кріплення підготовчих виробок. Застосовуються також технології відновлення міцності порід, що оточують підземні виробки [2]. Більшість технологій потребує прямих інвестицій, трудозатратні, металоємні. Проте є й такі технології, що сприяють стійкості підготовчих виробок без вкладення додаткових інвестицій. Такі технології є найперспективнішими і включають перш за все локальне чи масштабне розвантаження масиву від гірського тиску, а також забезпечення високих темпів видобутку корисних копалин.

Доведено [3,4], що збільшення темпів посування очисного вибію зменшує зміщення порід на контурі підготовчих виїмкових виробок, що просто примикають до діючої лави. Була встановлена безпосередня причина такого позитивного ефекту, яка пов'язана зі зміною процесу руйнування оточуючого виробку масиву гірських порід. Проте існує більш фундаментальний механізм скорочення величин необоротних зрушень і деформацій навколо виробки, яке відбувається на тлі швидкого навантаження масиву, оточуючого виробку. Для встановлення вказаної причини необхідно залучити нові закономірності спонтанного виникнення дисипативних структур унаслідок переходу порід у поза межній напружено-деформований стан [5-10].

Отже метою статті є уточнення закономірностей зменшення зрушень на контурі підготовчої виробки у результаті підвищення темпів посування очисного вибію.

Викладення основного матеріалу. Закономірності термодинаміки необоротних процесів, що відбуваються у масиві гірських порід і ґрунтів базуються на еволюції дисипативних структур, що спонтанно виникають у процесі необоротних зрушень зруйнованих гірських порід [5-7]. Встановлено, що під час ініціації необоротних зрушень ґрунту, або масиву гірських порід закономірно й спонтанно виникають дисипативні структури, які проявляються у вигляді характерного стійкого розподілу векторів інкрементальних зрушень і послідовно, стрибкоподібно змінюють одна одну на тлі зрушень фрагментів, які змінюються плавно, без розривів і зупинок [9]. Дисипативні структури являють собою стійкі утворення, що складаються з окремих короткоживучих кластерів, які зливаються, перегруповуються, або розділяються. Доведено, що в інкубаційний період розвитку необоротних зрушень переважають роторні й потокові паттерни, які сприяють накопиченню степенів вільності для фрагментів, що перетворює масив на дискретне середовище. Випадкові ж флуктуації дисбалансу внутрішніх сил, що діють усередині масиву гірських порід виконують роль тригерів, що запускають такі дискретні зміни паттернів дисипативних структур. З точки зору термодинаміки необоротних процесів інкрементальні вектори необоротних зміщень породних фрагментів виконують роль термодинамічних потоків, а флуктуації дисбалансу внутрішніх сил відіграють роль термодинамічних сил.

Ми вважаємо, що вирішальний вплив швидкості посування очисного вибію на стійкість підготовчої виробки здійснюється через далеку взаємодію кластерів дисипативних структур навколо гірничої виробки. Це було встановлено за допомогою шахтних інструментальних спостережень розтягування інтервалів масиву уздовж свердловин, в яких були розміщені глибинні репери. Дисипативні структури виявлялись у формі стрибкоподібного у часі і дискретного у просторі, а також несиметричного відносно осі виробки розширення зони зруйнованих порід а також несиметричного перерозподілу деформацій відносно розширення-стиснення порід навколо вертикальної осі перерізу виробки [9,10].

Далека взаємодія дисипативних структур ілюструється рис. 1, на якому за результатами комп'ютерного моделювання наведені розподіли полів інкрементальних зрушень породного масиву навколо підготовчої виробки під час необоротного деформування оточуючих порід. На рисунку наведено декілька послідовних розподілів приросту необоротних зміщень масиву навколо підготовчої виробки, що формували певні мозаїки або паттерни векторів-зміщень, з яких створювалися дисипативні структури, розсіюючи енергію гірського тиску. Видно, як на першому етапі (рис. 1, а) переважала структура, що формувалася потоком необоротних зрушень порід покрівлі. На другому етапі (фрагмент б) потік зрушень з покрівлі почав згасати, а замість нього розвинулося стікання зруйнованих порід з бокової стінки виробки.

На третьому етапі (рис. 1, в) вказаний потік вичерпався, а натомість активізувалось здимання порід, що залягали у підшві виробки. Характерно, що потік здимання додатково підживлюється з бокової стінки виробки завдяки вихору або ротору, вказаному стрілкою.

Моделювання виконано для умов пласта d_4 шахтоуправління «Покровське», яке відпрацьовує запаси на глибині понад 900 м, що створює значні проблеми з підтриманням підготовчих виробок. На рис. 2,б наведено знімок підготовчої виробки, який підтверджує актуальність згаданої проблеми. Величина здимання підшви виробки сягає 2 м і навіть більше, а інтенсивні деформації порід покрівлі і бокових стінок призводять до пластичного деформування рамного піддатливого кріплення й втрати його несучої спроможності.

На рис. 2,а наведено результати моделювання таких деформацій за допомогою платформи FLAC3D. Площа перерізу виробки становила 17 м², виробка кріпилась піддатливими рамами з профілю СВП33, що встановлені через 0,8 м. Додатково встановлено по 5-7 сталеполімерних анкерів довжиною 2,8 м у міжрамному просторі. Виїмкова потужність вугільного пласта становила 1,8 м, а у його покрівлі залягав 4-метровий шар алеволіту з міцністю на одноосьовий

стиск 50 МПа. Вище розташований потужний шар міцного пісковика. У підшві пласта розташований шар алевроліту що має міцність 40 МПа. Саме цей алевроліт й сприяв інтенсивному здиманню підшви виробки. Особливо інтенсивне здимання відбувалось у зоні опорного тиску лави, що рухалась повз підготовчої виробки.

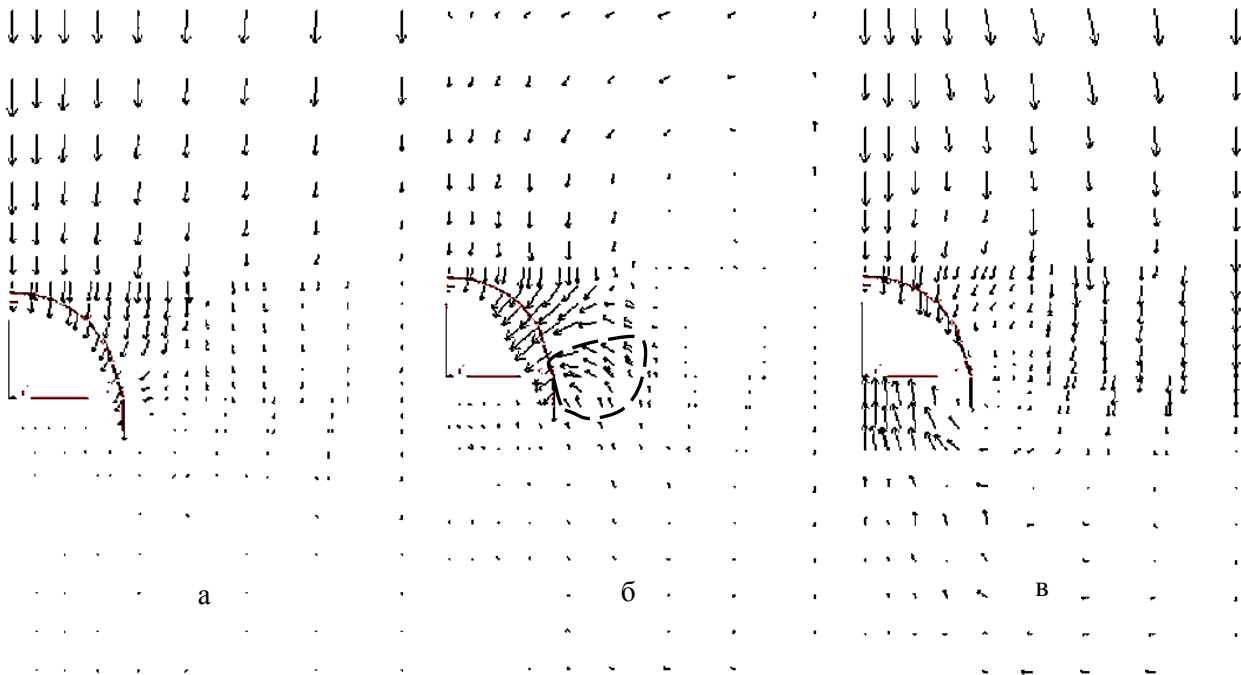


Рис. 1. Характерні паттерни дисипативних структур навколо підземної виробки

Одночасно з вказаним здиманням підшви спостерігалось осідання покрівлі виробки й конвергенція її бокових стінок. Це спричинило пластичні деформації рамного кріплення, стояки якого до того ж загнали у шар безпосередньої підшви пласта.

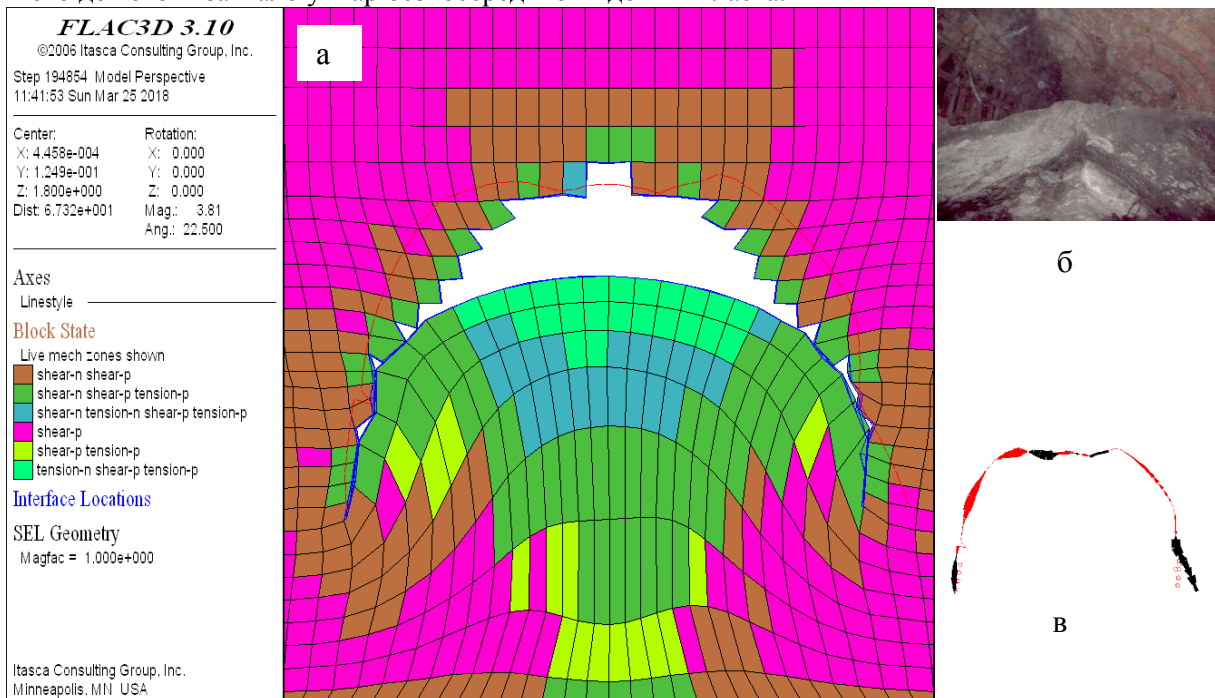


Рис. 2. Деформації перерізу підготовчої виробки: а – розподіл зон позамежного стану; в – розподіл крутних моментів уздовж профілю рамного кріплення; б – зовнішній вигляд виробки

Співставлення результатів моделювання й фактичних розмірів виробки засвідчив задовільну збіжність величин зрушень підосви, бокових стінок і покрівлі виробки. Відхилення розрахункових зрушень уміщуючих порід від фактичних, виміряних у натурних умовах не перевищило 21,2 % (табл. 1). Навантаження виробки у моделі здійснювалось протягом 10 діб. Причому величина концентрації опорного тиску зростала від 1 до 2,5 по мірі наближення очисного вибію до розрахункового перерізу виробки. Такі параметри граничних умов підбирались з розрахунку фактичної швидкості посування лави яке становило 150 м/міс, а довжина зони опорного тиску згідно натурним спостереженням становила 50 м.

Таблиця 1.

Зміщення на контурі виробки, мм

швидкість посування лави, м/міс	покрівлі			Зближення боків			здимання підосви		
	модель	натура	Відхилення, %	модель	натура	Відхилення, %	модель	натура	Відхилення, %
150	279	354	21,2	753	810	7,0	2052	1780	-15,3
300	253			695			1910		
	9,3			7,7			6,9		

Характерно, що рамне кріплення, яке моделювалось, також пластично деформувалось, що видно на фрагменті (в) рис. 2. Стан рам, які моделювались, узгоджувався з фактичним станом рамних комплектів у реальній виробці. Це помітно по такими ознакам, як пластичний прогин склепової частини верхняку рами, пластичні деформації нижніх частини стояків, які заганялись у породи підосви виробки, вигин стояків у бік порожнини виробки й розподіл та крок зміни крутних моментів уздовж осі рамного профілю. Довжина кроку, з яким змінювався знак крутного моменту навколо поздовжньої осі профілю коливається у межах 2-4 м, що повністю співпадає з фактичним кроком у натурних умовах.

Для дослідження впливу швидкості посування очисного вибію на величину деформації перерізу підготовчої виробки був виконаний чисельний експеримент з більшою швидкістю посування лави. Згідно практики ведення гірничих робіт в ш/у «Покровське» кілька лав досягали темпів посування, які перевищували 250 м/міс. Розрахунки показали, що за темпів посування у 300 м/міс коефіцієнт концентрації опорного тиску збільшується у даних умовах у 1,7 рази. Тому навантаження виробки на границі розрахункової області здійснювали протягом 5 діб, але коефіцієнт концентрації опорного тиску збільшували від 1 до $2,5 \cdot 1,7 = 4,25$.

Результати розрахунків наведені у таблиці 1. Як видно, відхилення розрахункових даних від виміряних у натурних умовах мають різні знаки, що свідчить про деяку невизначеність механічних властивостей порід, які використані у якості вхідних даних для моделювання.

Зменшення ж зміщень на контурі модельної виробки після підвищення швидкості посування лави складає у середньому 8% й мають виключно позитивний знак. Оскільки решта умов моделювання були однакові як за швидкості посування 150 м/міс, так і 300 м/міс, така різниця є закономірною й суттєвою. До того ж висновок добре узгоджується з результатами досліджень, опублікованими у [3], що свідчить про його достовірність.

Фундаментальна причина зменшення зміщень на контурі підготовчої виробки у разі зростання швидкості посування очисного вибію полягає у закономірності еволюції дисипативних структур, які спонтанно виникають навколо підготовчої виробки. У роботах [3,4] у якості причини ефекту зменшення зміщень на контурі підготовчої виробки висунуто таку. При зростанні темпів посування очисного вибію збільшуються розміри фрагментів масиву гірських порід, на які він дезінтегрується. Маючи більший розмір, ці фрагменти більш схильні до само-заклинювання й таким чином заважають один одному зрушуватися у порожнину виробки. Незважаючи на правильність висновку, відповідь на питання, чому величина зміщень порід стала меншою, залишається неповною.

Додатковий аналіз результатів моделювання, виконаний у даній статі, засвідчив, що зростає й середній розмір кластерів дисипативних структур, які періодично змінювали одна одну під час необоротних зрушень зруйнованого масиву, Так еквівалентний діаметр паттернів дисипативних структур збільшився у 1,1 рази. Один з таких кластерів окреслений пунктирною лінією на

фрагменті (б) рис. 1. Отже чим більше розміри кластерів, тим важче їм узгоджувати свій необоротний рух й еволюціонувати у бік накопичення степенів вільності, які сприяють розпушенню зруйнованих порід. Об'єм для розпушення ж оточуючі виробку породи можуть взяти лише з порожнини виробки. Таким чином повна відповідь щодо суттєвих факторів, що впливають на зменшення необоротних зрушень у порожнину виробки, повинна враховувати як збільшення розмірів породних фрагментів, так і кластерів, що формуються з цих фрагментів.

Додаткове й незалежне підтвердження зробленого висновку можна знайти наприклад у статті [11], автори якої виконали лабораторні експерименти з руйнування отвору (шпуру), який був виконаний у гранітному блоці. Експеримент виконувався наступним чином. У гранітному блоці вибурювали шпур діаметром 45 мм, який заповнювали сумішшю кварцового піску й води. Потім блок встановлювали під прес з сервомеханізмом й навантажували його з усіх трьох сторін напруженням 20 МПа. Витримавши певний час таке навантаження, звільняли шпур від піску, який підпирав його стінки, й починали навантажувати блок у напрямі, перпендикулярному осі шпуру. Навантаження виконували у режимі заданої деформації, застосовувавши три темпи деформування: 0,3 мм/хв, 04 мм/хв і 0,5 мм/хв. Навантаження припиняли після динамічного руйнування стінок шпуру у вигляді викиду. Викинуті ж фрагменти породи збирали й здійснювали його гранулометричний аналіз. У табл. 2 наведені параметри фракцій зруйнованої породи та їх відносна кількість. У трьох правих стовпчиках показаний вміст фракцій у відсотках.

Таблиця 2.

Результати гранулометричного аналізу зруйнованих фрагментів[11]

Розмір фрагментів, мм		0,3 мм/хв	0,4 мм/хв	0,5 мм/хв
<0,1	Мікро	6,33	6,69	6,9
0,1-1,25	Мілки	48,25	44,44	42,29
1,25-2,0	Середні	22,44	22,08	19,27
>2,0	Великі	22,98	26,79	31,63
		100,0	100,0	100,0

На рис. 3 наведено діаграму вмісту фракцій для кожної швидкості навантаження породного блоку. Вміст мікро- й середнього розміру фракцій практично залишається незмінним. Проте вміст мілких зерен неухильно зменшується з 48,25% до 42,29%, за рахунок чого збільшується вміст великих або грубих зерен, розмір яких перевищує 2 мм. Так вміст грубих фрагментів великого розміру збільшувався з 23% до 31,63%, або в 1,4 рази під час збільшення швидкості навантаження породних блоків у 1,7 рази. Таким чином результати моделювання отримали додаткове підтвердження своєї достовірності.

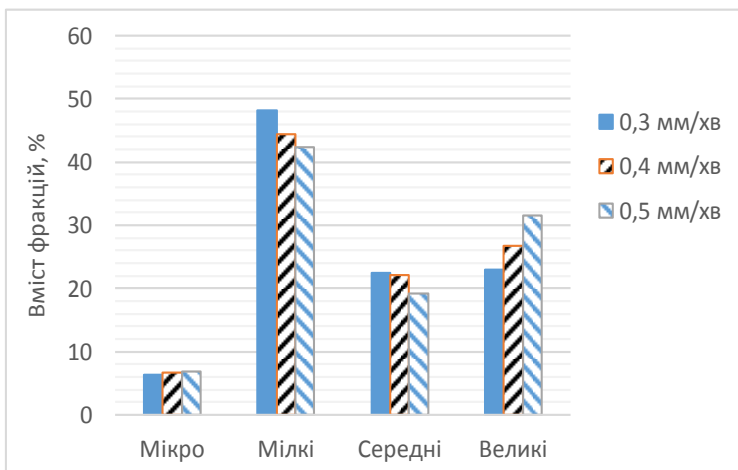


Рис. 3. Вміст різних фракцій зруйнованої породи в залежності від швидкості навантаження породного

регулюють розміри фрагментів, на які руйнується масив гірських порід, та розміри паттернів дисипативних структур.

Теоретичне тлумачення такого висновку криється у теоретичних основах термодинаміки незворотних процесів [12]. Згідно вказаної теорії дисипативні структури виникають під дією термодинамічних сил й термодинамічних потоків. У даному випадку роль термодинамічних сил виконує активний тиск, який прикладається від лабораторного пресу. Термодинамічні сили викликають термодинамічні потоки, які матеріалізуються у масиві гірських порід у вигляді певних паттернів дисипативних структур, наприклад у вигляді структурних потоків [5,9]. Саме ці потоки

У підсумку збільшення швидкості посування очисного вибію підвищує термодинамічну силу (інтенсивність гірського тиску) й сприяє приблизно такому ж неповоротному розсіянню його енергії, як і за менших темпів посування.

Як бачимо, підвищення темпів відпрацювання запасів має не тільки економічний ефект, але й геомеханічний з точки зору покращення стійкості підготовчих виробок, які обслуговують очисні вибії. Проте залишається проблема безпечного відпрацювання запасів швидкими очисними вибіями. Адже добре відомо, що запас потужності сучасних очисних комбайнів та конвеєрів дає змогу підвищити темпи посування лав утричі і навіть більше. Проте основним обмеженням для такого підвищення темпів є газовий фактор. Порухення допустимого вмісту вибухонебезпечного метану призводить до регулярних масштабних катастроф в Україні, Китаї, РФ й інших вугледобувних державах. Вирішення вказаної гострої проблеми залишається нагальною необхідністю.

Висновки. Причина зменшення необоротних зрушень порід на контурі підготовчої виробки під час зростання швидкості посування очисного вибію, що примикає до вказаної виробки полягає у наступному. Збільшення швидкості посування очисного вибію підвищує термодинамічну силу (інтенсивність гірського тиску), що сприяє приблизно такому ж неповоротному розсіянню його енергії, як і за менших темпів посування. У результаті збільшуються як розмір породних фрагментів, так і кластерів, що формуються з цих фрагментів. Отже чим більше розміри кластерів, тим важче їм узгоджувати свій необоротний рух й еволюціонувати у бік накопичення степенів вільності, які сприяють розпушенню зруйнованих порід. Об'єм для розпушення ж оточуючі виробку породи можуть взяти лише з порожнини виробки.

Подальшими дослідженнями планується вдосконалення технології відводу метану з очисних вибіїв для підтримання необхідної безпеки інтенсивного вугледобутку.

Список використаних джерел:

1. Шашенко, О.М., Солодянкін, О.В., Мартовицький, А.В. Управління стійкістю протяжних виробок глибоких шахт. Монографія. Дніпропетровськ: ТОВ "ЛізуновПрес", 2012.-314с.
2. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография. - Д.: Национальный горный университет, 2008. - 224 с.
3. Назимко, И.В. Исследование влияние скорости подвигания очисного забоя на характер деформирования покрывающих пород. Вісник КТУ. Збірник наукових праць. Кривий Ріг, 2006, 5(15), 41-45.
4. Назимко И.В. Исследование механизма необратимых сдвижений пород вокруг выемочной выработки при разной интенсивности возмущения // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. - Донецьк, №9, 2011, ч.1. - С. 343 - 357.
5. Захарова, Л.М. Фізичні основи еволюції дисипативних структур в геомеханіці. Lambert Academic Publishing: Saarbrcken. - 2017, 328 pp.
6. Захарова, Л.М. Фізичні основи еволюції дисипативних структур під час незворотного деформування масиву гірських порід після переходу у поза межний стан. Праці II міжнародної науково-технічної інтернет-конференції "Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі". КрНУ, м. Кривий Ріг, 2017.
7. Zakharova L. Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. Metallurgical and Mining Industry, 2015, No.6, pp. 40 - 43.
8. Nazimko V.V., Zakharova, L.M. Cluster behavior of the ground during its irreversible movement. Acta geodynamica et geomaterialia, 2017,14(188), 45-49
9. Грін'юв, В.Г., Захарова, Л.М. Основи забезпечення стійкості підготовчих виробок в умовах необоротного деформування масиву гірських порід. Уголь України, 2017,10, 3-11.
10. Захарова, Л.М. Дослідження дисипативних структур під час необоротних деформацій масиву гірських порід. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2014, 59, 112-118.
11. Tian B., Liu S., Zhang Y., Wang Z. Analysis of fractal characteristic of fragments from rock burst tests under different loading rates. Tehnički vjesnik 23, 5(2016), 1269-1276.
12. Glensdorf, P., & Prigogine, I. Thermodynamic theory of Structure, Stability and fluctuations. Brussels: Wiley, 1971.

Стаття надійшла до редакції 28.03.2018