

АНАЛІЗ ВАРІАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА РАМНЕ КРІПЛЕННЯ

© L. Zakharova

ANALYSIS OF LOAD VARIANCE ON THE FRAME SUPPORT

Виконано аналіз довготривалого моніторингу навантаження на кріплення у вигляді жорстких непіддатливих рам підготовчої виробки. За допомогою статистики Скеллама підтверджено факт виникнення дисипативних структур в оточуючих породах, що сприяють розсіюванню гірського тиску і накопиченню ступенів вільності, які дозволяють відбуватись необоротному деформуванню і зміщенню порід у порожнину виробки. Запропоновано управляти вказаними дисипативними структурами.

Выполнен анализ длительного мониторинга нагрузки на крепление в виде жестких рам подготовительной выработки. С помощью статистики Скеллама подтвержден факт возникновения диссипативных структур в окружающих породах, что способствуют рассеиванию горного давления и накоплению степеней свободы, которые позволяют происходить необратимому деформированию и смещению пород в полость выработки. Предложено управлять указанными диссипативными структурами.

Вступ. Актуальність проблеми забезпечення стійкості підземних виробок неухильно зростає зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин. Існує кілька перспективних напрямків вирішення вказаної проблеми. Серед них найбільшою популярністю користуються технології вдосконалення конструкцій кріплення, включаючи комбінування різних його типів, управління станом оточуючих порід, наприклад шляхом відновлення стійкості гірського масиву або збільшення його міцності, розвантаження масиву від гірського тиску, застосування спеціальних охоронних споруджень.

Одним з ключових параметрів, який необхідно знати для вдосконалення вказаних технологій є навантаження на кріплення та його динаміка у часі і просторі. Практика експлуатації підземних виробок свідчить про те, що параметри навантаження не є детермінованими й суттєво варіюють. Коливання величини навантаження, періоду його варіації, кореляції коливань з другими факторами прояву гірського тиску мають багато наслідків. З практичної точки зору такі коливання вимагають закладення значного запасу міцності під час конструювання самого кріплення. Також невизначеність варіації навантаження тягне за собою невизначеність розрахункових зміщень на контурі виробки і деформацій її перерізу. Коливання навантаження на кріплення має велике значення з позицій теорії, оскільки його варіації можуть приховувати важливі процеси, наприклад такі, що пов'язані з виникненням дисипативних структур, що розсіюють енергію гірського тиску [4]. На сьогодні вказані процеси майже не вивчені.

Стохастична природа проявів гірського тиску прямо впливає на практику розробки родовищ корисних копалин [8]. Останнім часом закономірності випадкових коливань проявів тиску жваво вивчаються математичними методами [6].

Проте експериментальні дослідження вказаної проблеми суттєво відстають. Особливо це стосується експериментальних спостережень варіації навантаження на кріплення гірничих виробок. Проте важливість інформації, отриманої шатними інструментальними спостереженнями неможливо переоцінити, а цінність результатів таких експериментів ніколи не старіє, що виокремлює їх як невирішену частину проблеми вивчення закономірностей варіації проявів гірського тиску. Отже ціллю статті є експериментальне дослідження варіації навантаження на рамне кріплення з позиції вивчення закономірностей еволюції дисипативних структур у масиві гірських порід

Характеристика експериментальної ділянки. У значній мірі рідкість даних про інструментальні спостереження навантаження на кріплення гірничих виробок обумовлено великою вартістю і трудомісткістю шахтних натурних експериментів. Проте у минулі роки такі експерименти здійснювались, а інформація про них опублікована. Зокрема докладний опис моніторингу навантаження на рамне кріплення капітальної підготовчої виробки в натурних умовах шахти ім. Абакумова опублікований проф. Орловим В.В. [5],

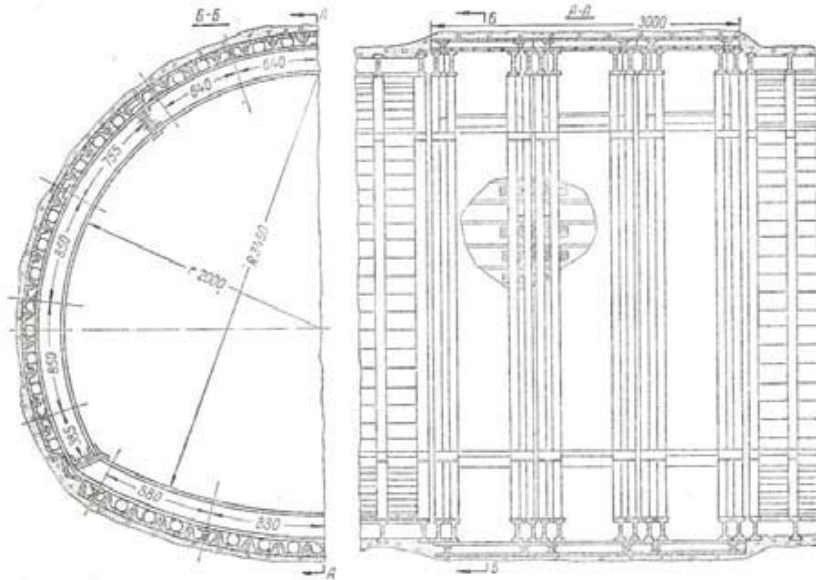


Рис. 1. Схема станції для моніторингу навантаження на рамне кріплення [5]

Експеримент з вимірювання тиску на кріплення проводився в обхідний польовий виробці з площею перетину $10,2 \text{ м}^2$ на горизонті 204 м, яка була пройдена по слабким аргілітам. Міцність порід по шкалі проф. Протодяконова дорівнювала 2. Експериментальну ділянку було обладнано шістьма замірними станціями, відстань між якими змінювалася від 0,29 до 0,81 м. Станції представляли собою металеві жорсткі арки, що мали зворотне склепіння зі здвоєних двотаврових балок №20а (рис. 1). Загальна довжина вимірювальної секції становила 3 м, що було близько до ширини виробки. Це дає підставу для розгляду впливу просторового ефекту на розподіл гірського тиску.

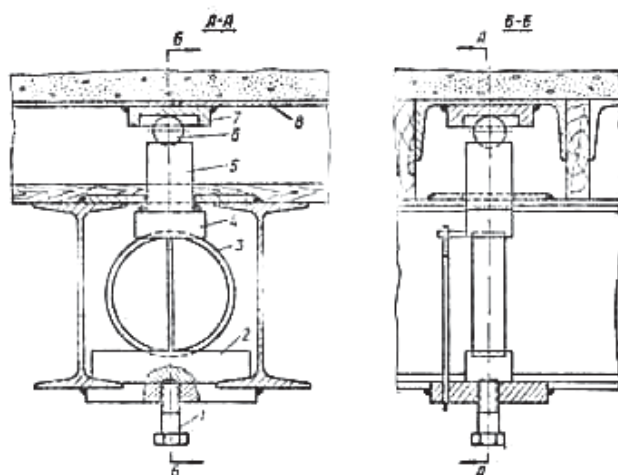


Рис. 2. Конструкція датчика навантаження й схема його установки [5]

Замірні рами склалися з двох бічних, верхнього і нижнього елементів, жорстко пов'язаних між собою лобовими замками, причому арки були стягнуті поздовжніми балками зі швелера №16а. Іншими словами конструкція вимірювальної секції з шести станцій представляла собою досить жорстку систему, яка дозволила виміряти розподіл тиску на кріплення з достатньою надійністю і точністю. На кожній рамі було закріплено по 16 кільцевих динамометрів, як показано на рис. 2. Всього було встановлено 96 динамометрів через 0,6-0,8 м по периметру і через 0,3-0,7 м уздовж осі виробки, що дозволило охопити вимірами загальну площу близько 40 м², і є представницьким з точки зору визначення закономірностей просторового розподілу гірського тиску.

Динамометри були виконані у вигляді чутливого елемента у вигляді кільця від шарикопідшипника. Кільце заглиблене у верхню і нижню опору і має можливість деформуватися уздовж нормалі до контуру виробки. Тиск порід передавався через сталеву кульку і плоску чашку, приварену до спеціальної з'язки, яка контактує з гірською породою через шар дрібної породи, глини і піску.

Перед установкою вимірювальних станцій проводилися ретельні підготовчі роботи з вирівнювання зони контакту з'язкування з оточуючими породами. Прогалини між динамометрами закладали так званими хибними динамометрами, а також дерев'яними брусками і дошками. Це забезпечило зниження перекосів, неоднорідностей контакту, що гарантувало низьку похибку вимірювань. Під час проведення спостережень вимірювали деформації кілець за допомогою індикаторів годинникового типу, що забезпечують точність до 0,01 мм. У процесі попереднього калібрування встановлено, що похибка вимірювань з ймовірністю 95% не перевищувала ± 2 кН, що в перерахунку на площу, підтримувану одним динамометром дорівнює 30 кПа.

Інструментальні спостереження виконувалися протягом трьох років в умовах активних зрушень оточуючих порід. У міру проведення вимірювань частина датчиків (в основному встановлених в підшві виробки) вийшла з ладу. Од-

нак в цілому вдалося отримати унікальні дані вимірювань, які свідчили про досить складний механізм зміни тиску в часі і просторі. Сам експеримент виконувався в 60-х роках. Тоді існуючі уявлення про механізм зміни гірського тиску в часі були декілька спрощені. Вважалося, що тиск з часом має тільки збільшуватися, а в просторовий розподіл навантаження повинен бути розподілений приблизно рівномірно. Тому проф. Орлов виявив лише загальну тенденцію зростання середнього рівня тиску з часом. Факт вкрай нерівномірного розподілу тиску у просторі, а також його сильна варіація в часі як в сторону збільшення, так і зменшення, не аналізувався. Разом з тим ці флуктуації у кілька разів перевищували помилку вимірювань і ніяк не можуть бути пояснені тільки похибками вимірів.

Випадкову варіацію навантаження на рамне кріплення проаналізували автори статті [7], зробивши наступні висновки. Тиск по периметру кожної станції в ході активних зрушень і формування зони непружних деформацій навколо підготовчої виробки змінюється від 3 до 450 кПа, причому різниця між сусідніми датчиками, що знаходяться на відстані 0,7 м досягає 480 КПа, що на порядок більше максимально можливої похибки вимірювань. Встановлено логнормальний розподіл тиску не тільки по периметру підготовчої виробки, а й у просторі по площі контакту кріплення з оточуючими породами. Та ж закономірність встановлена і по відношенню до перепаду навантаження на сусідні датчики, що зроблено вперше.

Поряд з ростом загального рівня тиску відбувається збільшення діапазону розкиду тиску в часі на експериментальній ділянці в цілому. В процесі розвитку зрушень у часі загальне збільшення тиску навколо виробки супроводжується його падінням на окремих датчиках, причому величина падіння у кілька разів перевищує максимально можливу похибку вимірювань. Так за три роки спостережень коефіцієнт варіації тиску показав стійке збільшення з 0,18 до 1,14. Автори статті [7] вважають цей факт дуже важливим, що свідчить про загострення неоднорідності перерозподілу тиску на активній стадії зрушень порід навколо виробки.

Локальні зони підвищеного тиску мають розмір порядку 1,1 м і мігрують в просторі, переміщаючись в будь-якому напрямку незалежно від того, який тиск був в тому місці, куди вони переміщаються.

Таким чином аналіз, виконаний авторами статті [7] довів, що отримані професором Орловим експериментальні дані містять значний потенціал з точки зору встановлення нових закономірностей стохастичного процесу перерозподілу гірничого тиску навколо підземної виробки, а також еволюції навантаження на її кріплення.

Проте потенціал можливостей не вичерпаний і отримані експериментальні дані можуть бути залучені для уточнення еволюції дисипативних структур, що сприяють розсіюванню енергії гірського тиску навколо виробки, що викладено у наступному розділі.

Аналіз варіограм перерозподілу навантаження на рамне кріплення. Як помітили автори статті [7], варіація навантаження на рамне кріплення неухиль-

но збільшувалась по мірі розвитку необоротних зрушень і деформацій оточуючого масиву. Так протягом трьох років коефіцієнт варіації навантаження підвищився у 6,33 рази. Це можна помітити, аналізуючи у часі і просторі еволюцію розподілу навантаження (рис. 3). Висновок про неухильне зростання варіації навантаження настановлює на думку про те, що розвиток різноманіття повинен сприяти породженню нових дисипативних структур [4] та підвищенню їх складності. Проте такий висновок є передчасним і повинен обґрунтовуватись кількісним аналізом.

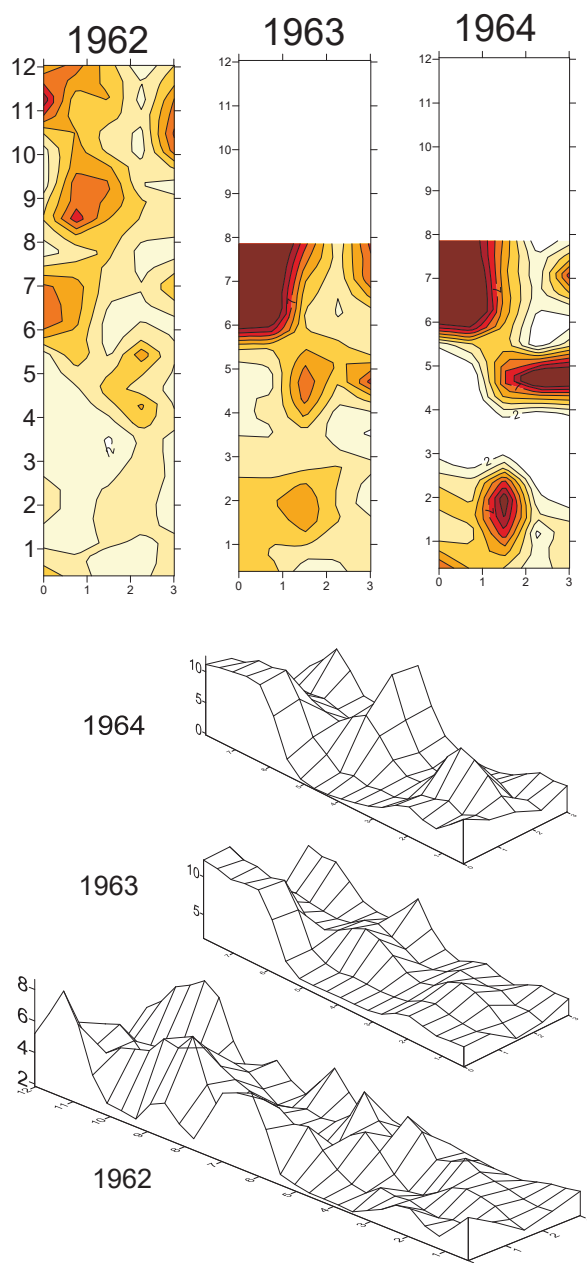


Рис. 3. Еволюція навантаження у процесі розвитку необоротних зміщень навколо виробки

Одним з найпотужніших інструментів, що застосовується для дослідження структурних закономірностей просторової хаотичності є так званий Z-аналіз [2]. Його парадигма закладена у аналіз варіограм просторового розподілу певних параметрів. У даному випадку йдеться про розподіл навантаження на рамне кріплення у просторі і його еволюцію у часі. Автори статті [7] аналізували різницю між показаннями сусідніх датчиків навантаження у певних напрямках (уздовж периметру виробки та впродовж її осі) окремо, причому враховувався тільки один сусідній датчик, хоча кожен з датчиків у даному випадку оточений якнайменше чотирма датчиками. Отже доцільно замість цього проаналізувати просторову хаотичність *градієнтів* навантаження.

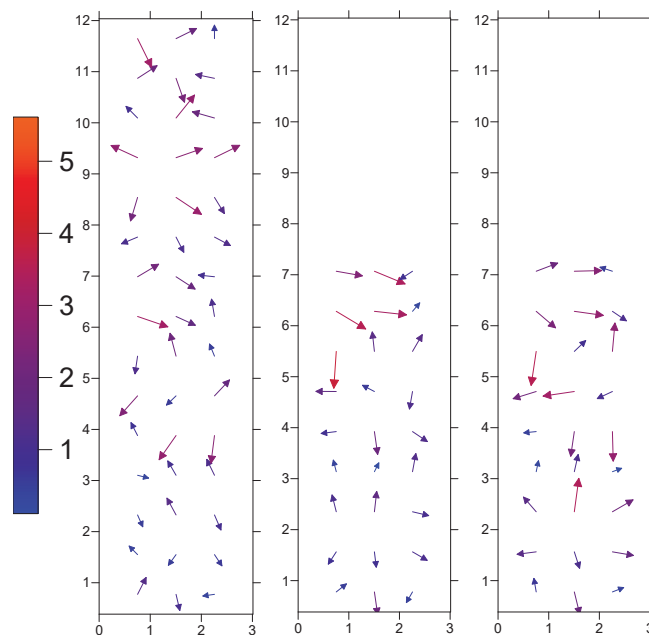


Рис. 4. Еволюція градієнтів навантаження рамного кріплення

На рис. 4 наведено розподіл вказаних градієнтів у часі і просторі. Можна помітити, що з одного боку перепади навантаження на окремих ділянках збільшуються, проте з іншого боку, картини розподілу дещо стабілізуються.

Статистичний аналіз розподілів цих векторів засвідчив, що ймовірність знаходження двох чи більшого числа однакових векторів, у яких були б однакові орієнтація й амплітуда не перевищує частки процента. Зауважимо, що співставлення цих параметрів здійснювалось з урахуванням похибки визначення вказаних параметрів. Іншими словами абсолютний збіг параметрів був би ще менш ймовірним. Статистична перевірка на кореляцію і автокореляцію векторів показала, що ними можна нехтувати.

Отже гістограма ймовірності збігу не протирічила розподілу Пуассона. За таких умов різниця між розподілами сусідніх векторів узгоджується з розподілом Скеллама [2]. Таким чином показчик або статистика Скеллама була застосована для визначення так званої повної просторової випадковості розподілу

градієнтів навантаження на рамне кріплення. Під час обчислення статистики Скеллама здійснювалась корекція FDR [1] відстаней між сусідніми векторами, яка прибирає найбільш строгі статистики (вимоги) й залишає найменш строгі. Такий метод, як показує практика, забезпечує кращі результати ніж ті, що дають консервативні (строгі) підходи.

На графіку рис. 5 видно, що показчик Скеллама неухильно зменшує своє значення з часом, що свідчить про зменшення варіації параметрів градієнтних векторів навантаження.

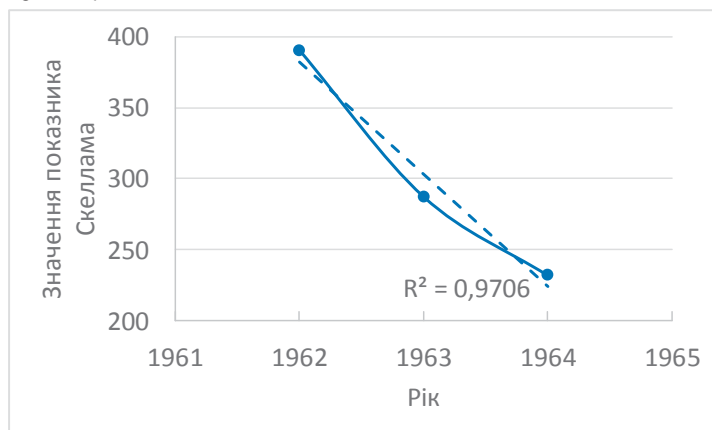


Рис. 5. Динаміка статистики Скеллама у часі

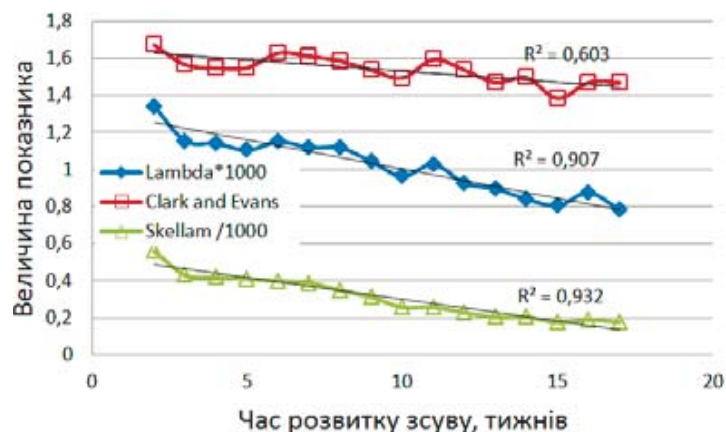


Рис. 6. Згасання показчиків варіації векторів у процесі розвитку зсуву

З термодинамічної точки зору це означає, що число дисипативних структур навколо експериментальної виробки з часом зменшується. Такий результат узгоджується з висновками, отриманими під час аналізу кінематики ґрунтових зсувів [4]. Достовірність висновку про зменшення числа дисипативних структур посилюється тим, що величини статистики Скеллама добре співпадають (порівняй графіки рис. 5 і рис. 6), незважаючи на, здавалось би, суттєву різницю процесів ґрунтового зсуву і перерозподілу навантаження на рамне кріплення підземної виробки. На початку процесів необоротних зрушень ґрунту і масиву гірських порід значення статистики Скеллама знаходилось у межах 400-500 одиниць, а на завершальній стадії, ближче до стабілізації процесів незворотних

зрушень показчик зменшився до значень 200-230. Величин показчика Скеллама Sk можна порівнювати для різних процесів, оскільки статистика є безрозмірною і обчислюється згідно формули:

$$Sk = 2\pi\lambda\sum(S_i)^2,$$

де S_i позначає відстань між сусідніми датчиками,

λ - Середня просторова щільність, яка визначається за такою залежністю:

$$\lambda = N/[Range(X)Range(Y)],$$

де N – число датчиків (96), $Range(X)$ і $Range(Y)$ – діапазон координат уздовж периметру виробки (0,385м - 12,035м), та впродовж осі виробки (0 – 3,01 м).

Отже незважаючи на висновок авторів статті [7] про неухильне збільшення варіації навантаження на сусідні датчики, варто зазначити, що процеси необоротних зрушень ґрунту чи масиву гірських порід становляться з часом по структурі простішими. Причина такого ефекту згасання дисипативних структур криється у накопиченні ступенів вільності протягом необоротних зрушень. Дисипативні структури сприяють накопиченню такої вільності, а потім, виконавши свою місію, згасають.

Обговорення результатів. Розподіли градієнтів навантаження, наведені на рис. 4, дають можливість зробити ще один важливий висновок. Попередньо зауважимо, що фактично вимірювалось не навантаження як таке, а радіальні *переміщення стрижнів* кільцевих датчиків, які штовхала покрівля, бокові стінки і підшва виробки у порожнину виробки. Отже існує велика ймовірність, що перепади нормальних необоротних зрушень можуть породжувати незворотні зрушення *порід* уздовж осі виробки. Така гіпотеза добре підтверджується у маркшейдерській справі, де горизонтальні зміщення земної поверхні можна з великою надійністю визначити як функцію перепадів вертикальних осідань. Більш того, такі зміщення, що перевищували похибку вимірювань на порядок, зареєстровані у виробці, що закріплена піддатливим рамно-анкерним кріпленням [3]. Необоротні ж зрушення уздовж осі витягнутої виробки означають, що стан плоскої деформації зникає після переходу оточуючих порід через межу міцності. Цю обставину варто тримати на увазі, якщо моделювати процеси руйнування масиву навколо підготовчої витягнутої виробки.

Піддатливе кріплення дозволяє відбуватись необоротним зміщенням оточуючих виробку порід, які на порядок перевищують конвергенцію у капітальній виробці, що закріплена жорсткими рамами. Отже у виробках з піддатливим кріпленням дисипативні структури будуть виражені набагато сильніше, що й підтверджується шахтними інструментальними спостереженнями [3]. Проте, як показав цей аналіз, навіть у виробках з жорстким непіддатливим кріпленням такі структури є закономірними. Це ставить актуальну задачу управління вказаними структурами для забезпечення стійкості виробок.

Висновки. За умов, коли підготовчу виробку проходять у нестійкому гірському масиві, безпосередньо у момент після її проходки необоротні зрушення оточуючих порід супроводжуються дисипативними структурами, що виника-

ють під дією випадкових флуктуацій термодинамічних параметрів (коливання міцності, температури, вологості, впливу мікродфектів). Вказані дисипативні структури ефективно розсіюють енергію гірського тиску і є засобом накопичення ступенів вільності для розвитку необоротних деформацій і зміщень оточуючих порід у порожнину підготовчої виробки. По мірі розвитку зруйнованої зони навколо виробки і незворотного зміщення оточуючих порід у порожнину виробки інтенсивність генерації дисипативних структур спадає. Вперше ця закономірність підтверджена зменшенням статистики Скеллама від 400 у момент, коли почалось руйнування оточуючих порід до 230, коли зруйновані породи розпушилися й притиснулись до рамного кріплення підготовчої виробки. Тому одним з перспективних напрямків підвищення її стійкості є управління вказаними структурами за рахунок обмеження ступенів вільності і усунення можливості почергового зміщення окремих фрагментів породи, що характеризує практичну значимість результатів виконаного дослідження.

Подальшими дослідженнями планується обґрунтування і розробка нових конструкцій і вдосконалення технологій кріплення, які б ефективно управляли дисипативними структурами масиву гірських порід навколо підготовчої виробки.

Перелік посилань

1. Caldas de Castro M., and Burton H. S. (2016) Controlling the False Discovery Rate: A New Application to Account for Multiple and Dependent Test in Local Statistics of Spatial Association. *Geographical Analysis* 38, pp. 180-208.
2. Ebdon, D. (1985) *Statistics in Geography*. Blackwell.
3. Zakharova L. (2015) Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. *Metallurgical and Mining Industry*, No.6, pp. 40 - 43.
4. Захарова Л.М. Дисипативні структури, що супроводжують руйнування й не-оборотне деформування ґрунту і масиву гірських порід. *Фізика і хімія твердого тіла*. Т. 18, №2 (2015) С. 252-258. DOI: 10.15330/pcss.18.2.252-258.
5. Орлов В.В. *Натурные измерения проявления горного давления на шахтах им. Абакумова и Щегловка-Глубокая. Разработка месторождений полезных ископаемых*. – К.: «Техника». – 1966. – №7. – С. 5–17.
6. Сдвижкова О.О., Бугрим О.В., Бабець Д.В., Иванов О.С. *Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики в гірництві*. Навчальний посібник. — Дніпропетровськ: НГУ, 2015. — 103 с.
7. Хохотва А.И., Назимко В.В., Сажнев В.П., Пожитько И.И. Закономерности перераспределения во времени давления на крепь подготовительной выработки. *Проблеми гірського тиску*, №9, 2003, с.75-93.
8. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. *Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография*. – Д.: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.

ABSTRACT

Purpose. The objective of the paper is to investigate dissipative structures that may emerge due to irreversible ground movement around underground opening.

Methodology. Irreversible movement of the ground has been monitored with special gages, which provide registration of the normal and radial relatively center of the roadway displacements of the surrounding rocks. These gages were calibrated to determine the ground pressure that loads supporting the roadway frames. Nearest neighbor statistic and Skellam factor have been employed to analyze spatial variance of the load.

Findings. The roadway and surrounding rock mass acts as an open thermodynamic system that might create dissipative structures, which scatter the potential energy of rock mass deformation. The dissipative structures were detected through gradient of the load vectors distribution. It turned out that the dissipative structures are the most active at the beginning of the irreversible development of the collapsed zone around the underground roadway. The more the sizes of this zone the less intensive dissipation of the ground pressure energy was. In spite of the fact that variance of the load steadily increased as development of collapsed zone was progressing, the dissipative structures subsided their activity, that was proven with Skellam factor, which diminished magnitude from 400 down to 230 dimensionless units.

Originality. It was in the first time when the fact of the dissipative structures subsidence has been proven using quantitative data. In addition, nobody proposed to control the dissipative structures before.

Practical implications. Controlling the dissipative structures provides new opportunities to enhance stability of the underground roadways.

Keywords: *ground pressure, irreversible ground movement, dissipative structures, Skellam factor.*

УДК 622.273.217.4

© А.М. Кузьменко, М.В. Петлёванный

РАЗРУШЕНИЕ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИИ ЕГО ВОЗВЕДЕНИЯ

© А. Kuzmenko, M. Petlovanyi

BACKFILLING MASSIF FAILURE DEPENDENT ON CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Приведены результаты аналитических исследований причин разрушения закладочного массива в зависимости от технологии его формирования. Установлено, что распределение прочности закладки в заложеной камере имеет нелинейный характер, а области вывала совпадают с выпуклостью графика наименьших значений распределения прочности. Выявлено, что разрушению закладочного массива способствует отклонение некоторых свойств закладочной смеси от технологии и появлением на его контуре опасных растягивающих напряжений, значения которых могут превосходить прочность закладки на растяжение, что вызвано неоднородной прочностной характеристикой закладочного массива по высоте камеры.

Наведено результати аналітичних досліджень причин руйнування закладного масиву в залежності від технології його формування. Встановлено, що розподіл міцності закладки в