

угольного басейна / Т.А. Василенко, В.А. Ступак, Е.А. Пронский // Физико-технические проблемы горного производства : сб. научн. тр. – Вып. 17 / под общ. ред. В.Г. Гринёва. – Донецк : Ин-т физики горных процессов НАН Украины, 2014. – С. 20-26.

10. Молчанов А.Н. Усовершенствованный комплекс оборудования для исследования сорбционных свойств ископаемых углей / А.Н. Молчанов // Физико-технические проблемы горного производства : сб. научн. тр. – Вып. 14 – Физико-технические основы оценки состояния углепородного массива / Под общ. ред. А. Д. Алексеева. – Донецк : Ин-т физики горных процессов НАН Украины, 2011 – С. 42 – 53.

11. Алексеев А.Д. Обоснование методики определения количества и фазового состояния метана в углях методом ЯМР / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, Т.А. Василенко [и др.] // Вісті Донецького гірничого інституту: Всеукраїнський науково-технічний журнал гірничого профілю / Гол. ред. С.М. Александров. – № 1. – Донецьк : ДонНТУ, 2005. – С. 174-177.

12. Венгеров И.Р. Математическое моделирование фильтрации десорбирующегося метана в неоднородных угольных пластах / И.Р. Венгеров, А.Н. Молчанов, А.А. Камчатный // Физико-технические проблемы горного производства : сб. научн. тр. – Вып. 17 / под общ. ред. В.Г. Гринёва. – Донецк : Ин-т физики горных процессов НАН Украины, 2014. – С. 27-37.

УДК 622.1:622.83

## ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІЗМУ НЕОБОРОТНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПІСЛЯ ПЕРЕХОДУ У ПОЗАМЕЖНИЙ СТАН

*Л.М. Захарова, Інститут фізики гірничих процесів НАН України, Україна*

Досліджено дисипативні структури, які виникають у масиві гірських порід після переходу його у позамежний стан. Обґрунтовано методику виявлення вказаних структур й доведено, що вони формуються під дією близької взаємодії породних фрагментів, а також дальнього кооперування їх кластерів під час необоротних зрушень й деформацій зруйнованих порід. Показано, що дисипативні структури виникають як у гірському масиві, так і у системах рамного кріплення, що не сприяє їх стійкості й збереженню несучої спроможності. Обґрунтовано принципи підвищення стійкості виробок й відібрані найбільш перспективні технології для управління вказаними дисипативними структурами.

**Вступ.** Незворотне деформування та зрушення масиву гірських порід починається з їх переходу у позамежний стан після досягнення межі міцності й охоплює широкий діапазон необоротних деформацій, величина яких на кілька порядків перевищує такі, що виникають під час пружного деформування породної товщі. Саме тому протягом незворотної стадії деформування накопичуються основні деформації підземних конструкцій, ґрунтових схилів, які виконують корисну дію (наприклад ущільнення, локальне розвантаження), або породжують небезпеку для оточуючого середовища, підземних споруд та наземних конструкцій і будівель.

Незворотне деформування твердого тіла, і масиву гірських порід зокрема, традиційно розглядали до недавнього часу як перехід до хаосу, що супроводжується руйнуванням кристалічної решітки мінералів, безладного обвалення покрівлі, втрати геологічної структури масиву, що супроводжувалось зростанням ентропії масиву. Проте гірський масив, який знаходиться в активній стадії деформування зазвичай пропускає через себе й перетворює потоки енергії гірського тиску, теплової енергії, а також обмінюється речовинами (наприклад флюїдами) з оточуючим середовищем. Відповідно до законів термодинаміки незворотних процесів [1] такий нерівноважний стан масиву може створювати дисипативні структури, які виникають у наслідок самоорганізації системи, якою у даному випадку є масив гірських порід.

**Стан питання, виділення невирішеної частини проблеми.** Останнім часом набуває поширення новий науковий напрям щодо синергетики процесів, що відбуваються у гірському масиві. Так Паламарчук Т.А., Alkan Н. дослідили взаємодію структурно-фазових процесів та

фрактальні характеристики різних гірничо-геологічних структур [2]. Синергетику механо-гідралічних полів встановив Садовенко І.О. [3] Вивчаючи сипучі середовища, Ревуженко А.Ф. довів що їх динаміка супроводжується синергетичними процесами, а Шемякін Є.І., Александров С.М., Хоменко О.Є. та інші встановили механізми зональної дезінтеграції масиву навколо підземних підготовчих виробок [4,5]. Фрактальні характеристики масивів гірських порід Опарін В.Н., Хачай О.О. і Шестопапов А.В. розглядають як стабільні параметри, за якими можна оцінювати фазові переходи геологічних структур та їх синергетику під час динамічних збурень [6,7]. Саттаров С.С., Кенжин Б.М. досліджують синергетику та біфуркацію станів породного масиву навколо гірничих виробок. Munoz H., Xu P. C., Fang Z., Zhao L.Y., та інші довели можливість виникнення структур у гірських породах та ґрунтах у процесі дисипації енергії гірського тиску [8].

Виконані дослідження свідчать, що ймовірність виникнення дисипативних структур у масивах гірських порід, які до речі являють собою відкриті термодинамічні системи, суттєво зростає під час необоротного деформування, коли породи переходять за межу їх міцності. Як показали Гленсдорф П., Пригожин І., Хакен Г. та інші, самоорганізація термодинамічних систем виникає через механізм взаємодії їх компонент. Це підтверджується роботами Паламарчука Т.А., Садовенка І.О., Хачая О.О. та інших дослідників, які довели важливу роль взаємодії механічних, гідралічних, акустичних, теплових полів у процесі еволюції гірських масивів, формування їх структур, фільтрації флюїдів. Проте важливий механізм кінематики й механічної взаємодії окремих компонент гірського масиву після переходу його у позамежний стан залишається невивченим і з'ясований у загальному вигляді, про що свідчить постійне зростання кількості гіпотез щодо вказаного механізму, наприклад гіпотез щодо механізму зональної дезінтеграції масиву навколо гірської виробки. Це заважає розвитку нових ефективних технологій забезпечення стійкості гірських масивів, ґрунтових схилів, підземних конструкцій та наземних будівель. Натомість частота виникнення небезпечних зсувів ґрунтових схилів, руйнування наземних споруд, втрати стійкості підземних гірських виробок і навіть масштабних катастроф не зменшується. Це свідчить про актуальність фізичних основ кінематики й механізму незворотного деформування масиву гірських порід після його переходу у позамежний стан. Отже **ціллю** даної роботи є дослідження вказаного механізму.

**Викладення основного матеріалу.** Авторкою даної доповіді вперше обґрунтована методика виявлення дисипативних структур, які виникають у масиві гірських порід і супроводжують необоротні його зрушення й деформації. Доведено, що дисипативні структури у масиві гірських порід після його переходу у позамежний стан виявляються моніторингом його елементарних зрушень, величина яких знаходиться у межах 2-10 середньо-квадратичних похибок вимірювання зрушень, причому центри кластерів визначаються методом К-середніх, а їх межі полігонами Вороного у Евклідовому просторі.

Дисипативні структури виглядають як кластерна мозаїка (або паттерни) інкрементальних векторів необоротних зрушень, що візуально формують тимчасові вихори (ротори), потоки, стоки і витoki та віяла. У процесі розвитку необоротних зрушень масиву паттерни змінюються стрибкоподібно у результаті біфуркацій дисипативних структур, що відбуваються під впливом випадкових флуктуацій гірського тиску та термодинамічних параметрів масиву гірських порід (температури, вологості, суцільності, дефективності). Рис. 1 демонструє кілька послідовних розподілів приросту необоротних зміщень масиву навколо підготовчої виробки, що формували певні мозаїки або паттерни векторів-зміщень, з яких створювались дисипативні структури, розсіюючи енергію гірського тиску.

Видно, як на першому етапі (а) переважала структура, що формувалась потоком необоротних зрушень порід покрівлі. На наступному етапі (б) потік зрушень з покрівлі почав згасати, а замість нього розвинувся стік зрушених порід з бокової стінки виробки. На третьому етапі (в) вказаний потік вичерпався, а натомість розвинулось здимання порід, що залягали у підшві виробки. Характерно, що потік здимання додатково підживлюється з бокової стінки виробки завдяки вихору або ротору, вказаному стрілкою.

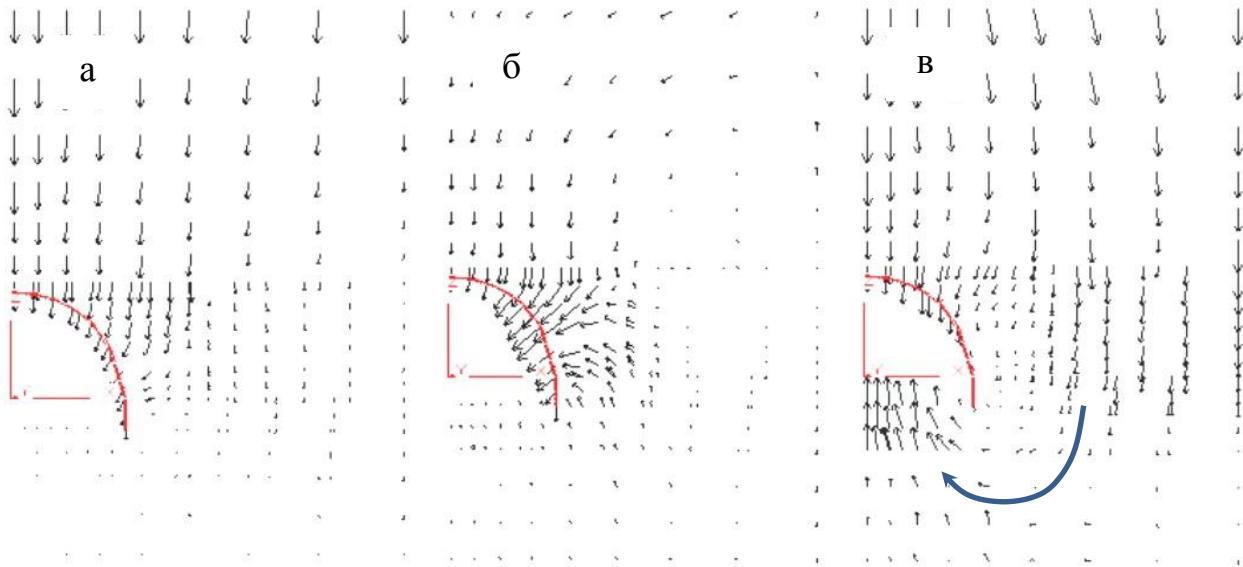


Рис. 1. Характерні паттерни дисипативних структур навколо підземної виробки

Доведено [9,10], що дисипативні структури виникають у результаті близької взаємодії породних фрагментів й дальньої взаємодії їх кластерів.

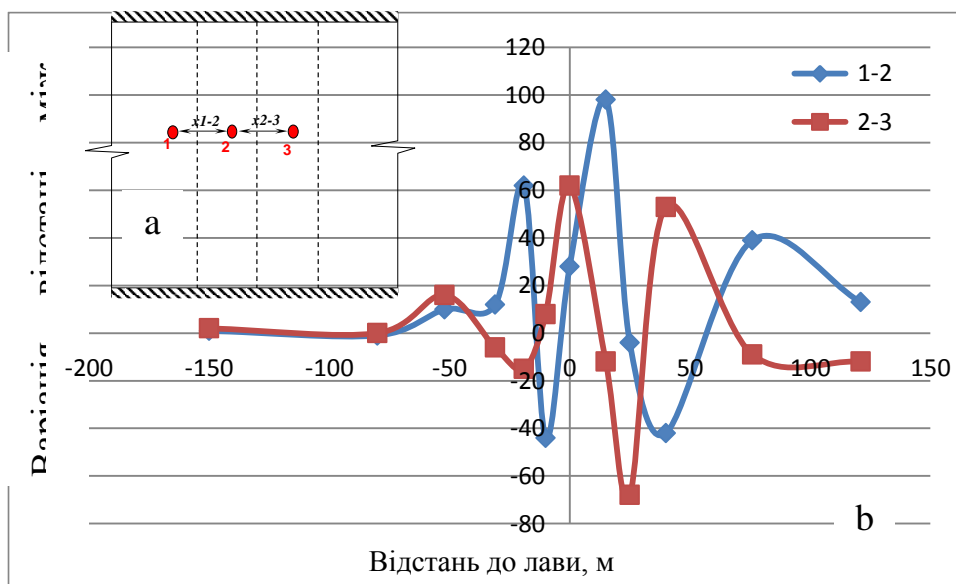


Рис. 2. Близька взаємодія породних фрагментів: інкрементальні зрушення суміжних анкерів (б); схема інструментальних спостережень (а)

Близька взаємодія суміжних породних фрагментів реалізується у вигляді почергових необоротних зміщень. На рис. 2 показано, як головки суміжних анкерів, встановлених у покрівлю штреку змінювали відстань між собою уздовж вісі виробки під час активних необоротних зрушень у зоні опорного тиску (від'ємні значення відстані до очисного вибою), та зоні активних зрушень позаду лави (позитивні відстані). У вказаному діапазоні навколо виробки сформувалась зона зруйнованих порід, що призвело до їх інтенсивних необоротних зрушень у порожнину виробки. Дисипативна структура проявляється у вигляді періодичного процесу протифазного необоротного зрушення окремих сусідніх породних блоків і фрагментів. Коли один з фрагментів прискорює вертикальне осідання у порожнину штреку, сусідні уповільнюють, причому зсуваються уздовж осі

виробки таким чином, щоб збільшити ступені свободи або простір для прискореного руху першого фрагменту. Наприклад у зоні опорного тиску на діапазоні відстаней від -30 до -10 м пара анкерів 2-3 зменшила свою відстань на 20 мм у той час, як сусідня пара 1-2 збільшила на 63 мм. У наступний момент навпаки: анкери 1-2 скоротили свою відстань на -40 мм, у той час як пара 2-3 підвищила на 62 мм. Таке періодичне у часі й почергове у просторі узгоджене коливання необоротних зрушень масиву сприяло інтенсивному деформуванню перерізу виробки й означало фактичну втрату плаского деформованого стану.

Аналогічна дисипативна структура виникала й у рамному кріпленні виробки. Власне замки піддатливості рам і є основним конструктивним елементом, який повинен реалізувати розсіювання енергії гірського тиску, яка передається з оточуючих порід на рами. Згідно стендовим випробуванням, замки піддаються елементарними порціями проковзувань, у результаті чого опір рам періодично варіює. Галузевий стандарт обмежує варіацію опору рам величиною  $\pm 10\%$  від їх номінальної несучої спроможності. Проте на відміну від стендових випробувань, у шахтних умовах варіація опору часто сягає 100%, причому замки піддатливості у кращому випадку реалізують свою піддатливість по черзі. Нажаль, досить типовою ситуацією є така, коли один замок піддається, а протилежний заклинюється, або величина піддатливості обох замків суттєво (у кілька разів) відрізняється, що призводить до перекошування та втрати стійкості рами й падіння її несучої спроможності.

Ще одна форма близької взаємодії у системі рамного кріплення являє собою поздовжнє скручування рамного спецпрофілю (рис. 3) і виникає внаслідок заклинювання замків піддатливості, або дії масштабного ефекту. Скручування реалізується у вигляді періодичних хвиль, що слідують одна за одною, закручуючи профіль умовно за, та проти часової стрілки. Встановлено, що кількість таких хвиль на спецпрофілі СВП33 зростає від 2 у виробках з площею перерізу у світу  $15 \text{ м}^2$  до 5-7 у виробках, площа перерізу яких сягає  $25 \text{ м}^2$ .



Рис. 3. Поздовжнє скручування рамного спецпрофілю

Дальня взаємодія кластерів, що утворюються з породних фрагментів, які рухаються узгоджено, реалізується у вигляді несиметричного стрибкоподібного розширення зруйнованої зони навколо виробки (рис. 4), й почергового зміщення порід покрівлі, боків та підшви польової виробки, як зображено на рис. 1. Початкове рівноважне положення границі зони зруйнованих порід показано позицією 1 на рис. 3. Повз вказану польову виробку проходила суміжна лава, що збурила пружний стан масиву, який вийшов з рівноваги, у результаті чого почався подальший розвиток зруйнованої зони. Спочатку границя цієї зони пересунулась у бік падіння й підшви виробки (позиція 2). Через місяць руйнація розширилась у сторону повстання (позиція 3), а ще через місяць у покрівлю (позиція 4). Несиметричність розвитку зон позамежного стану масиву навколо виробок підтверджено на кількох експериментальних ділянках у різних гірничо-геологічних умовах, що свідчить про достовірність описаної закономірності.

Дистанційна взаємодія рамного кріплення реалізується у вигляді виходу рам з площини, яка є перпендикулярна до поздовжньої осі виробки з послідовним масовим розворотом рам уздовж вертикальної вісі симетрії перерізу виробки, або його горизонтальної осі. Така узгоджена кооперативна поведінка рам призводить до втрати їх стійкості й несучої спроможності.

Отже небажані дисипативні структури залучують додаткові ступені свободи як для оточуючого масиву, так і для рамного кріплення, що негативно відбивається як на їх стійкості, так і на несучій спроможності.



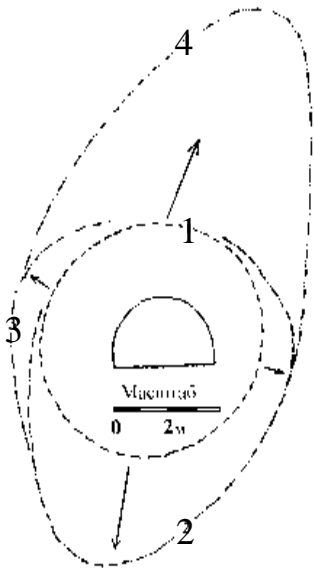


Рис. 4. Почерговий у часі й несиметричний у просторі розвиток зруйнованої зони руйнувань масиву навколо виробки

Виникненню таких дисипативних структур сприяє ще й масштабний ефект. Найбільш масивний спецпрофіль СВП33 був спроектований ще у 60-х роках минулого століття й призначався для застосування у виробках з площею перерізу, що не перевищувала 13-15 м<sup>2</sup>. Тоді й темпи проходки виробок були набагато меншими, що дозволяло якісно забучувати закріпний простір.

Розширення площі поперечного перерізу виробок до 20 м<sup>2</sup> і більше потребує згідно теорії подібності збільшення розмірів спецпрофілю, пружності й міцності металу, а також зміцнення масиву гірських порід, що оточують виробки, оскільки вони тепер перетинають більшу кількість тріщин за решти однакових умов. Іншими словами необхідно враховувати й задовольняти геометричний і динамічний критерії подібності. Сьогодні середньостатистична величина зазорів, які залишаються між рамами та породним оголенням становить 300-350 мм. У сукупності всі ці фактори забезпечують додаткові ступені свободи для рамного кріплення, що створює сприятливі умови для виникнення небажаних дисипативних структур у системі рамного кріплення й оточуючому виробку масиві гірських порід. До того ж дисипативні структури гірського масиву та рамного кріплення взаємодіють одне з одним, посилюючи тенденцію до залучення додаткових ступенів свободи.

Таким чином головний принцип підвищення стійкості виробок повинен базуватись на придушенні вказаних дисипативних структур шляхом обмеження ступенів свободи як для оточуючого виробку масиву, так і для системи рамного кріплення. Технології забезпечення стійкості виробок повинні проектуватись таким чином, щоб максимально наближувати пружно-деформований стан виробки до плоскої деформації, а рамам необхідно обмежити усі ступені свободи, окрім поступальних у площині, нормальної до вісі виробки й обертальної навколо поздовжньої осі виробки.

На основі отриманих наукових результатів обґрунтовані перспективні технології, які задовольняють викладені вимоги (рис. 5).

Технології перелічені у правому стовпчику зверху до низу у порядку збільшення ефективності. Технологія нанесення бетону на породне оголення шляхом його набризку не може забезпечити значне зчеплення бетонного розчину з породою. Проте вплив набризк-бетону на породні фрагменти і блоки, які знаходяться безпосередньо на поверхні підземної виробки досить суттєвий саме з точки зору обмеження ступенів свободи породних фрагментів на контурі виробки. Інша справа, що позитивний ефект набризк-бетону швидко загасає по мірі віддалення у глибину масиву. Тому набризк-бетон обмежує можливості близької взаємодії суміжних породних фрагментів, що вказано цифрою (1).

Аналогічний ефект проявляють міжанкерні стяжки, наприклад як елемент анкерно-стяжного кріплення. Варто додати, що стяжки повинні бути заздалегідь натягнуті, щоб їх ефект був достатній.

Більш ефективним є комбіноване рамно-анкерне кріплення **спільного опору**. Підкреслимо, що ефективна протидія процесам самоорганізації дисипативних систем здійснюється тільки спільним опором рам, та анкерів, для чого вони повинні бути з'єднаними між собою. Анкери та канати опираються розтягуючим зусиллям, а рами навпаки, здійснюють стискування порід, які розшаровуються. Отже комбінування цих зусиль породжує позитивний синергетичний ефект, коли обидва типи кріплення допомагають один одному і таким чином узгоджують свій опір. Важливо також, що з'єднання рам та анкерів сприяє фіксації рам у просторі виробки, що утруднює використання додаткових ступенів свободи окрім дозволених. Іншими словами рами не можуть розвертатись й виходити з площини, що є перпендикулярною поздовжній вісі виробки.

Окремим важливим об'єктом вдосконалення комбінованого рамно-анкерного кріплення є сама конструкція піддатливих рам. Наразі залишається невирішеною проблема узгодження роботи

рами й замків піддатливості. Оскільки замки, розсіюючи енергію гірського тиску за рахунок тертя, переходять у автоколивальний режим роботи, піддатливість реалізується у вигляді послідовних періодичних елементарних актів проковзування сегментів один відносно одного а також конструктивних елементів замка піддатливості. Для стабілізації їх роботи необхідно, щоб величина елементарного акту піддатливості замка не перевищувала 3-5 мм, а амплітуда варіації його опору не виходила за межі 10% від несучої спроможності, оскільки майже 90% енергії гірського тиску розсіюється піддатливим кріпленням саме такими деформаціями замків.

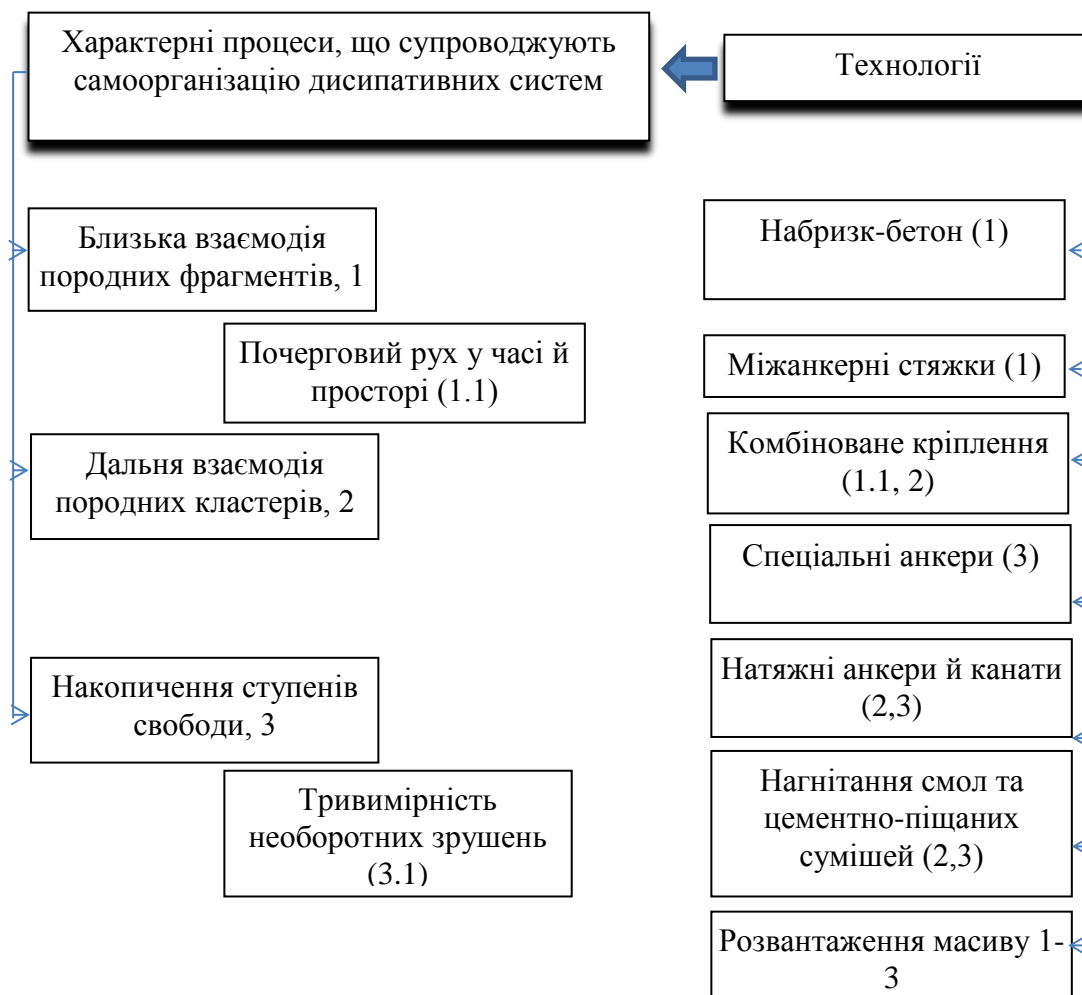


Рис. 5. Схема впливу технологій на дисипативні системи, що утворюються під час необоротних деформацій масиву гірських порід

Доведено, що такі вимоги рамне кріплення забезпечує тільки на спеціальних стендах, які обмежують усі ступені свободи рами окрім поступального у площині рами, та обертального уздовж її поздовжньої осі. У шахтних умовах переважна більшість існуючих конструкцій замків піддатливості не задовольняють вказані вимоги, а отже потребують подальшого вдосконалення.

Спеціальні анкери можуть зменшити можливості залучення додаткових ступенів свободи, якщо їх нахилити по площини породного оголення під різними кутами у різні сторони. Така схема установки анкерів створює просторову конструкцію, що здатна генерувати стабілізуючі реактивні сили уздовж осі виробки.

Велику перспективу мають натяжні анкери й канати. Така технологія дає можливість відновлювати несучу спроможність зруйнованого масиву і залучати значні резерви підвищення стійкості виробок. Зокрема ця технологія дозволяє позбавитись від пере-кріплення виробок з випуском зруйнованої породи.

Аналогічна висока ефективність притаманна й нагнітання смол та цементно-піщаних сумішей у зруйнований масив. Як натяжні анкери, так і нагнітання вигідно відрізняються вибірковістю, цільовою направленістю дії, й комплексним ефектом, що ліквідує близьку

взаємодію породних фрагментів й дальню кооперацію їх кластерів, а також блокує можливість залучати додаткові ступені свободи.

Велику перспективу мають технології розвантаження масиву гірських порід від гірського тиску у малому масштабі навколо підготовчої виробки або у великому шляхом відпрацювання розвантажувальних лав. Ці технології зменшують рівень гірського тиску і таким чином ліквідують енергію, яка може витратитися на необоротне зрушення порід, що оточують виробку.

### Висновки

Дисипативні структури у масиві гірських порід після його переходу у позамежний стан виникають у результаті близької взаємодії породних фрагментів й дальньої взаємодії їх кластерів і виявляються моніторингом його елементарних зрушень, величина яких знаходиться у межах 2-10 середньо-квадратичних похибок вимірювання зрушень, причому центри кластерів визначаються методом К-середніх, а їх межі полігонами Вороного у Евклідовому просторі, що дозволяє виявити вказані дисипативні структури й обґрунтувати новий принцип забезпечення стійкості масивів гірських порід шляхом активного обмеження кількості (аж до трьох) поступальних й обертальних ступенів свободи масиву, що деформується у позамежному стані.

Близька взаємодія суміжних породних фрагментів здійснюється у вигляді почергового їх зрушення у протифазовому режимі, коли один фрагмент прискорюється у той час як суміжний уповільнюється і навпаки. Близька взаємодія елементів системи рамного кріплення реалізується у вигляді почергової у часі й просторі піддатливості замків, різній величині піддатливості умовно правого й лівого самка і поздовжньому скручуванні спецпрофілю рам.

Дальня взаємодія породних кластерів відображається почерговим розвитком у часі і просторі зони позамежного стану гірського масиву навколо підземної гірничої виробки, а також варіацією кластерної мозаїки (паттернів дисипативних структур) у середині цієї зони.

Дальня взаємодія рам відображається у вигляді виходу рам з площини, яка є перпендикулярна до поздовжньої осі виробки з послідувачим масовим розворотом рам уздовж вертикальної вісі симетрії перерізу виробки, або його горизонтальної осі. Така узгоджена кооперативна поведінка рам призводить до втрати їх стійкості й несучої спроможності. Це дало можливість вдосконалити паспорти анкерного кріплення гірських виробок й підвищити їх стійкість у складних геомеханічних умовах.

### Список літератури

1. Kondepudi D. Prigogin I. Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. Second edition. John Wiley & Sons; XXVI, 2015.- 524p.
2. Паламарчук Т.А. Элементы механосинергетики породного массива / Т.А. Паламарчук, В.Я. Кириченко, Б.М. Усаченко. - Днепропетровск: «Лира ЛТД», 2006. - 307 с.
3. Sadovenko I.A. Dynamics of loess mass deformation due to technogenic load. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2(66)2014: 164-171.
4. Александров С.Н. Принципы обеспечения устойчивости подготовительных выработок управлением эффектом саморасклинивания вмещающих пород // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ООО «Лебедь». – 2001. – №3. – С. 36–39.
5. Хоменко О.Е. Энергетический метод исследования зональной дезинтеграции горных пород / О.Е. Хоменко // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 4. – С. 44 – 54.
6. Опарин В.Н, Востриков В.И., Жилкина Н.Ф., Тапсиев А.П., Аршавский В.В. О пульсирующем режиме сейсмоэнерговыведения из напряженных участков шахтных полей.// Проблемы и перспективы развития горных наук. Тр. Межд. конф. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2015. Т.1. С.7-16.
7. Шестопалов А.В. Конвективные ячейки и бифуркации в краевой части горного массива сильно удаленной от исходного механического равновесия. — Сб. Применение симметрии и косимметрии в теории бифуркаций и фазовых переходов. / Тезисы докладов Международной школы-семинара SCDS-II (18-23 сентября 2001г., г.Сочи, Лазаревское). — Ростов-на-Дону: РГУ, 2001. С.59-60.
8. Zhao L.Y., Zhu Q.Z., Xu W.Y., Dai F., Shao J.F. A unified micromechanics-based damage model for instantaneous and time-dependent behaviors of brittle rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 84, April 2016, Pages 187-196.
9. Zakharova L. Close interaction of rock fragments in underground roadway during irreversible movement of surrounding rock mass. Metallurgical and Mining Industry, No.6, 2017, 40 - 43 pp.
10. Захарова Л.М. Дисипативні структури, що супроводжують руйнування й не-оборотне деформування ґрунту і масиву гірських порід. Фізика і хімія твердого тіла. 2016. -№4.-С.48-62.