

Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.83

Л.М. Захарова¹, В.Г. Гриньов¹, І.О. Дедіч², М.Е. Гордієнко³,
А.Б. Кусень², Е.В. Френтцель³, В.В. Назимко¹

РОЗРОБКА СПОСОБУ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ОПОРУ РАМНОГО КРІПЛЕННЯ І ЙОГО ПІДДАТЛИВОСТІ

¹ Інститут фізики гірничих процесів НАН України,
49600, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2-а.

² ПрАТ «Донецьксталь»,
85300, Донецька обл., м. Покровськ, вул. Торгівельна, 106А.

³ ДТЕК,
01032, м. Київ, вул. Льва Толстого, 57.

Розроблено спосіб, який забезпечує можливість безперервного моніторингу піддатливості рамного кріплення та його опору гірському тиску протягом усього терміну експлуатації виробки. Розроблена конструкція пристрою для надійної реалізації способу та підібрані її раціональні параметри. Проведено аналіз результатів випробування нової технології й поставлені задачі подальших досліджень.

Ключові слова: рамне кріплення, піддатливість, динаміка гірського тиску, моніторинг.

Вступ

Гірнича промисловість є гарантом сировинної незалежності нашої держави. Але з розвитком видобутку корисних копалин, родовища, які розроблювались відкритим способом вичерпуються, а глибина підземної розробки неухильно збільшується, що призводить до посилення негативних проявів гірського тиску. Саме тому актуальність підтримання підземних виробок у стійкому стані постійно зростає. Як наслідок, необхідність вдосконалення систем кріплення посилюється. Незважаючи на велику популярність анкерного кріплення, необхідність застосування рамного, або комбінованого рамно-анкерного кріплення не тільки не зникає, але й підвищується зі зростанням глибини розробки. Така тенденція спостерігається у вугільній промисловості Польщі [3], Чехії [4], Китаю [5, 6], України та інших державах [7]. Варто також наголосити на тому, що адаптацію до інтенсивних необоротних зрушень і деформацій оточуючих порід забезпечують тільки системи рамного піддатливого кріплення, або їх комбінації з анкерами.

Незважаючи на довгу історію застосування такого кріплення його ефективність залишається незадовільною, а актуальність вдосконалення навіть зростає. Невирішеними гострими проблемами є втрата стійкості рам внаслідок пластичних деформацій спецпрофілю, розриву замків піддатливості, передчасна втрата несучої спроможності, втрата піддатливого режиму. У процесі вдосконалення рамного кріплення однією з актуальних задач є визначення навантаження на рами. Враховуючи, що мова йде про піддатливі рами, коректніше буде сказати про необхідність визначення *опору* рам, а не навантаження

1. Огляд існуючих способів визначення опору піддатливих рам

До теперішнього часу спеціалістами розроблено широкий спектр технологій, що дозволяють визначити опір рамного кріплення. У якості найбільш популярних технологій вирішення такої задачі застосовують аналітичні методи, або методи числового комп'ютерного моделювання [1, с. 144-151]. Проте ці методи не завжди здатні забезпечити достовірні результати оцінки опору рам. У реальних умовах підземної розробки родовищ корисних копалин часто виникають ситуації, які заздалегідь неможливо передбачити. Разом з тим вони можуть суттєво змінювати умови роботи кріплення, що відбивається на його опорі та піддатливості. Отже найбільш достовірним способом визначення опору рамного кріплення залишається шахтний експеримент.

Важливо зауважити, що переважна кількість відомих способів визначення опору рамного кріплення основана на одномоментних вимірюваннях опору у дискретні моменти часу. У результаті отримують неповну інформацію про роботу рами, що призводить до зниження достовірності висновків, які виводяться з результатів вимірювань. Патентний пошук вказує на велику кількість запропонованих пристроїв для вимірювання опору рамного кріплення, причому різні конструкції базуються на значному спектрі фізичних ефектів і принципів. Як приклад можна навести наприклад монографію [2, с. 313-316], де автори запропонували оригінальний спосіб визначення опору рам, який вимірює опір у дискретні моменти часу за розподілом згинальних моментів уздовж периметру рам. Оригінальність підходу полягає у тому, що фактично вимірюють кривизну поздовжньої вісі спецпрофілю, а величину моментів визначають як функцію вказаної кривизни.

Існують різноманітні підходи визначення опору рам у натурних умовах розробки підземних родовищ. Способи вимірювання опору рамного кріплення базуються на використанні різноманітних фізичних ефектів і оригінальних прийомів. Наприклад відомий спосіб шахтних вимірювань навантаження на рамне кріплення [8] згідно якому застосовується пружний елемент у вигляді тензодатчика, який наклеюється на зовнішню поверхню спецпрофілю стояку рамного кріплення. Під верхняк рами встановлюють гідравлічний стояк з манометром і розпирають його між підшвою гірничої виробки і верхняком до моменту, коли показання тензометричного датчика стабілізується. Наванта-

ження на рамне кріплення визначають по калібрувальній характеристиці тензOMETричного датчика у залежності від відхилення електричного опору датчика.

В інших способах про опір рамного кріплення судять за його власної частоти вібрації [9], або застосовується спеціальна динамометрична зтяжка [10]. Спектр фізичних ефектів і прийомів дуже різноманітний. Проте переважна більшість розроблених або запропонованих способів здатні лише визначати опір рами. Для фіксації її піддатливості необхідно окремо застосовувати додаткові пристрої.

Загальним недоліком пристроїв є низька надійність безперервного моніторингу навантаження. Для забезпечення безперервного моніторингу протягом кількох років використовують електромеханічний перетворювач. Проте гарантувати його роботу у важких підземних умовах обмеженого простору, вугільного пилу, вологості, температури й інтенсивного гірського тиску неможливо. У результаті прояву інтенсивного гірського тиску виробка зменшує свої розміри, а рамне кріплення деформується у процесі піддатливості. Зменшення габаритів виробки скорочує простір й зазори між діючим обладнанням, у результаті чого збільшується ймовірність обриву або пошкодження різними маніпуляціями, а також транспортними засобами електромеханічних перетворювачів, та електричного кабелю, який необхідний для безперервної передачі й запису результатів моніторингу навантаження на рамне кріплення, та його піддатливості.

Пил, особливо вугільний та агресивні підземні води можуть призвести до корозії електромеханічного перетворювача, та замикання електричного ланцюга, за допомогою якого повинні безперервно передаватись дані моніторингу. Коливання температури й вологості, а також динамічні удари, що супроводжують піддатливість рамного кріплення, спричиняють викривлення характеристики електромеханічного перетворювача. Отже вказані фактори безпосередньо знижують надійність роботи пристрою. Результати моніторингу будуть неповні, перериватись у часі, й міститимуть похибки, обумовлені короткими замиканнями, витокami струму у вологому середовищі, що зменшує достовірність результатів моніторингу навантаження і піддатливості рамного кріплення.

Теоретично більшу частину відомих способів вимірювання опору рамного кріплення можна модифікувати так, щоб вони виконували безперервний у часі моніторинг поведінки кріплення. Для цього необхідно додатково застосувати електромеханічний перетворювач, який як уже сказано вище, є чутливим до механічних, електричних пошкоджень, що знижує його надійність. Практика свідчить про те, що самим надійним способом моніторингу опору рамного кріплення був і залишається механічний.

Зауважимо, що застосування додаткових пристроїв типу механічних самописців відомої конструкції має такий же самий недолік, як і електромеханіч-

них перетворювачів. По-перше, привід механічного самописця необхідно періодично заводити, або заряджати енергією, що незрівнянно підвищує трудомісткість способу. По-друге, у суворих умовах підземного видобутку такий самописець буде рано чи пізно зруйнований. По-третє, переважна більшість відомих конструкцій здатні моніторити окремо опір рами, або її піддатливість, але не обидва параметри одночасно.

2. Постановка задачі

Виконаний аналіз свідчить про те, що наразі не існує надійного способу для виконання безперервного моніторингу одночасно опору піддатливих рам й їх піддатливості. Існуючі конструкції не здатні реалізувати таку задачу. Аналіз також показав, що рішення необхідно шукати у колі чисто механічних способів. Безперервний моніторинг опору й піддатливості рамного кріплення важливий тому, що від дозволяє виявити дисипативні структури, які відіграють важливу роль під час реалізації необоротних процесів [11–13]. Саме піддатливість рами є типовим незворотним процесом розсіювання потенційної енергії гірського тиску. Отже задача полягала у тому, щоб розробити такий спосіб, який дозволить здійснювати безперервний довготривалий надійний одночасний моніторинг опору й піддатливості рамного кріплення за допомогою простого механічного пристрою

3. Обґрунтування принципу безперервного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення

Логіка системного мислення [14] допомагає сформулювати ряд принципів, на основі яких доцільно вирішувати поставлену задачу. По-перше, спосіб безперервного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення повинен бути якомога простішим; по-друге, – базуватись на чисто механічному принципі запису показчиків опору й піддатливості рами; по-третє, – бути енергозаощадливим, оскільки процес моніторингу триває роками, тобто протягом усього життєвого циклу рами. Остання вимога допомагає знайти джерело енергії, а саме енергію гірського тиску, яка перетворюється у кінетичну енергію руху сегментів рами (верхняку, стояків, або обох).

Сформульована парадигма настановує на думку про те, що пристрій для реалізації способу повинен перетворювати кінетичний рух сегментів у показчики опору й піддатливості, а для забезпечення надійності сам пристрій необхідно сховати у порожнину коробчастого профілю СВП. Оскільки переважна кількість рамних конструкцій побудована так, що верхняк вкладено у стояки, пристрій повинен перетворювати енергію верхняку у показчики опору й піддатливості рами. Зрозуміло, що цей пристрій повинен записувати значення показчиків і бути з'єднаним з верхняком. Оскільки пристрій повинен бути суто механічним, запис амплітуди опору й піддатливості можна виконати на днищі стояків. Це зручно зробити шляхом шкрябання днища стояків.

4. Розробка конструкції самописця

Отже вимальовується конструкція пристрою у вигляді пружинного важеля, один кінець якого прикріплено до торця верхняку, а другий кінець має маркер або маркер-голку, яка здатна наскрябати слід на днищі стояку. Величина піддатливості точно дорівнює сліду, який прокреслить голка. Але залишається невирішеною проблемою реєстрації амплітуди опору рами. Для цього згадаємо, що вивільнення кінетичної енергії нерозривно пов'язано з інерційністю. Ефект інерційності можна залучити шляхом приєднання до кінця важеля важок, а сам важіль виконати у вигляді пружини. Якщо центр тяжіння важка буде зміщено відносно точки закріплення пружини, важок буде відхиляти маркер від прямої лінії, яка є паралельною поздовжній осі стояків, причому амплітуда відхилення повинна бути пропорційною кореню квадратному з кінетичної енергії, яка вивільняється під час проковзування верхняка.

На рис. 1 наведена конструкція пристрою для безперервного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення. Фрагмент (а) відображає ліву верхню чверть піддатливого рамного кріплення, яке вказане позицією 1, позиція 2 відповідає верхняку, позиція 3 – стояку, 8 – нахлестці, 20 – породному оголенню, 21 – зтяжці. На рис. 1,б наведений збільшений фрагмент А з рис. 1,а. Позиція 7 позначає днище спецпрофілю, 14 – його внутрішня поверхня, 15 – задній кінець пружини, 16 – пружина, 17 – передній кінець пружини, 18 – важок, 19 – маркер.

На рис. 1,г показано розріз Б–Б фрагменту (б). Позиція 4 вказує на спецпрофіль, 5 – його полиці, 6 – його бокові стінки, 9 – проміжок, 10 – замок піддатливості, 11 – його скоба, 12 – його фігурна планка, 13 – його гайки, 24 – зовнішня поверхня спецпрофілю. На рис. 1,в наведено повернутий на 90° вид В фрагменту (а). Позиція 22 вказує поздовжню вісь спецпрофілю 4, верхняку 2 і стояка 3, позиція 23 – лінія що проходить через задній 15 і передній кінець 17 пружини 16, а символ α – кут між лініями 22 і 23.

Пристрій для безперервного моніторингу навантаження на рамне кріплення і його піддатливості складається з піддатливого рамного кріплення 1, що складається з верхняку 2 і двох стояків 3, які виготовлені зі спецпрофілю 4, що має полиці 5, бокові стінки 6 й днище 7 з внутрішньою 14 та зовнішньою 24 поверхнею, а також пружно-піддатливого елемента 16 в якості якого застосована пружина 16, причому задній кінець 15 пружини 16 жорстко прикріплений до внутрішньої поверхні 14 днища 7 спецпрофілю 4 верхняку 2, а передній кінець 17 жорстко прикріплений до важка 18, кінець якого забезпечений маркером 19, який притиснутий до внутрішньої поверхні 14 днища 7 спецпрофілю 4 стояку 3, з можливістю пересування (проковзування) по цій поверхні, на яку нанесено покриття з акрил-вінілового полімерного матеріалу.

Приклад конструкції пристрою для безперервного моніторингу навантаження на рамне кріплення 1 і його піддатливості наведений для наступних

умов. Пружина 16 має форму лемніскати Бернуллі, яка забезпечує оптимальне перетворення поступального руху верхняку 2 відносно стояку 3 у коливальний рух маркера 19. Пружина 16 виготовлена з нержавіючого дроту діаметром 1,2 мм, а її задній кінець 15 приварено до днища 7 сталевго верхняку 2, який виготовлено з спецпрофілю СВП27. Передній кінець 17 пружини 16 приварено до сталевго важка 18, кінець якого виконано гострим, тобто сформовано у вигляді маркера 19. Жорсткість пружини 16 дорівнює 110 Н/м, маса важка 18 становить 0,05 кг.

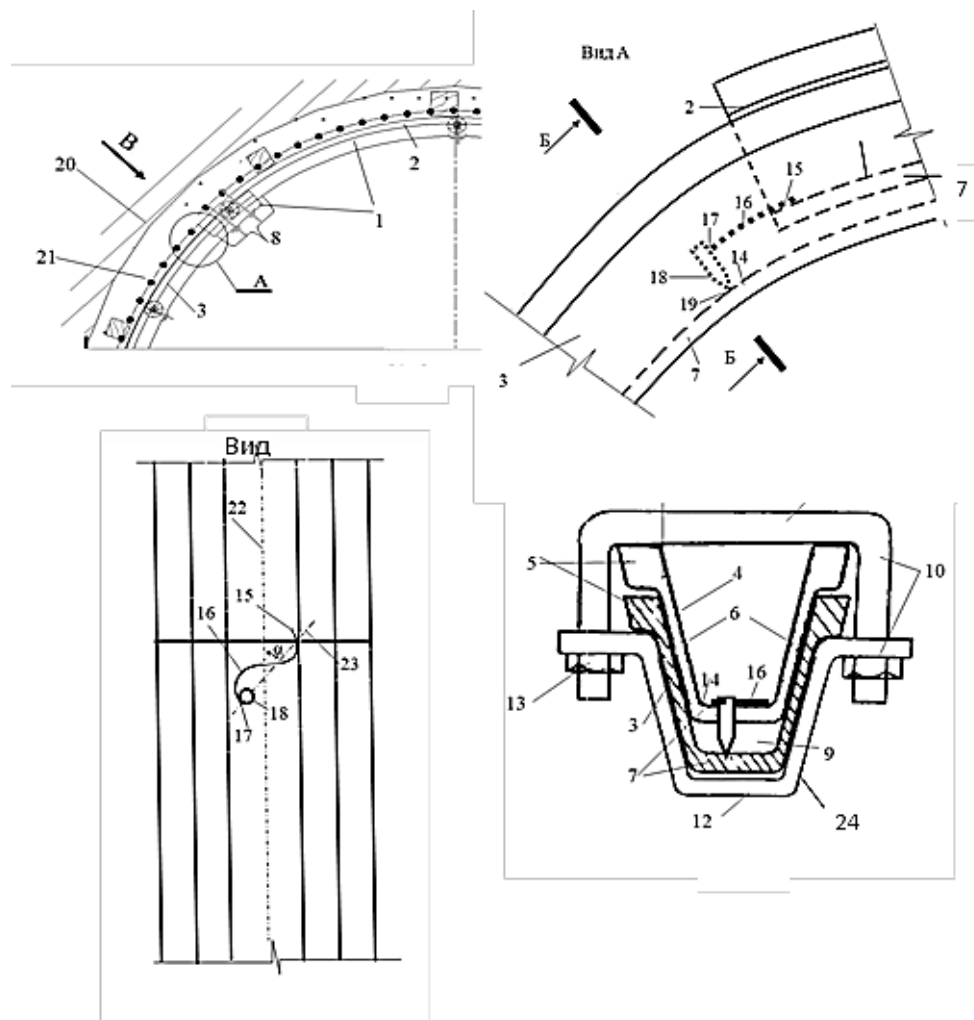


Рис. 1. Конструкція для здійснення безперервного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення

Важок 18 притиснутий маркером 19 до внутрішньої поверхні 14 днища 7 спецпрофілю 4 стояку 3 з силою 1 Н. Відстань між переднім 17 і заднім 15 кінцями пружини 16 дорівнює 0,8 ширини днища спецпрофілю або 45 мм, а кут α нахилу лінії 23, що проведена через передній 17 і задній 15 кінець пружини 16 і поздовжньою віссю 22 спецпрофілю 4 стояка 3 має величину 40° .

На внутрішній поверхні 14 днища 7 стояку 3 нанесено напилюванням шар клею ПВА (на кресленні не вказаний), який захищає внутрішню поверхню 14 від корозії. Рамне кріплення 1 встановлене у підземній виробці вугільної шахти (на кресленні не показана) безпосередньо біля породного оголення 20. Термін експлуатації виробки три роки. Верхняк 2 і стояк 3 стулені нахлесткою 8 довжиною 0,4 м і стиснуті замком піддатливості 10, причому між верхняком 2 і стояком 3 є проміжок 9.

На рамне кріплення 1 укладають дерев'яну затяжку 21, а проміжок між затяжкою 21 і породним оголенням 20 забутовують шматками породи. Це забезпечує захист пружини й важка від пошкоджень.

5. Опис конструкції у роботі

На рис. 2 наведено графіки, необхідні для визначення опору й піддатливості рамного кріплення. Попередньо необхідно зняти у лабораторних умовах характеристику замка піддатливості, який буде застосований під час зборки рами. Вказана характеристика повинна бути представлена у вигляді графіку залежності опору замка від величини його піддатливості (рис. 2,а). У даному випадку показана характеристика замка постійного опору.

Пристрій функціонує наступним чином. Під дією гірського тиску породне оголення 20 зміщується у порожнину виробки і навантажує рамне кріплення 1. У результаті верхняк 2 проковзує відносно стояка 3 так, що нахлестка 8 збільшується. Таким чином, верхняк 2 штовхає пружину 16 уздовж осі 22 спецпрофілю 4 стояка 3. Якщо верхняк 2 рухається відносно стояку 3 без прискорення (плавно, поступально), то важок 18 рухається теж поступально і прямолінійно, тобто паралельно осі 22, прокреслюючи пряму лінію 3 (вказаною пунктиром на рис. 2,б) на полімерному покритті. Це означає нормальну роботу замка піддатливості 10, яка описується графіком (робочою характеристикою) 1 на рис. 2,а. За умови ж, коли замок 10 заклинюється, верхняк 2 рухається стрибкоподібно, з прискоренням. Важок 18, маючи інерційну масу, не встигає миттєво зреагувати на це прискорення і відхиляє передній кінець 17 пружини 16 у бік заднього кінця 15. Як наслідок, маркер 19 креслить (дряпає) на полімерному покритті поверхні 14 криву лінію 2 (рис. 2,б) у вигляді коливальних відхилень маркеру 19 від прямої лінії 3. Чим більше була сила заклинювання замка 10, тим більше буде прискорення, а отже і відхилення 2 маркеру 19 від прямої лінії 3. Це дозволяє скоригувати робочу характеристику 1 замка (рис. 2,а) і отримати реальний графік 4 залежності навантаження на рамне кріплення від його піддатливості (рис. 2,в). Величина піддатливості абсолютно ідентична величині пересування маркеру 19 уздовж поверхні 14 й вимірюється рулеткою.

Для прив'язки процесу піддатливості до часу наносяться у певні моменти часові мітки шляхом нанесення каліброваних ударних імпульсів по рамі 3 у напрямку, перпендикулярному до її осі 22. Часові мітки вказані вертикаль-

ними стрілками на фрагменті (б) рис. 2. Реальний графік 4 залежності навантаження на рамне кріплення від його піддатливості (рис. 2,в) отриманий шляхом введення поправок з кривої 2 графіку рис. 2,б на робочу характеристику 2 замка (рис. 2,а).

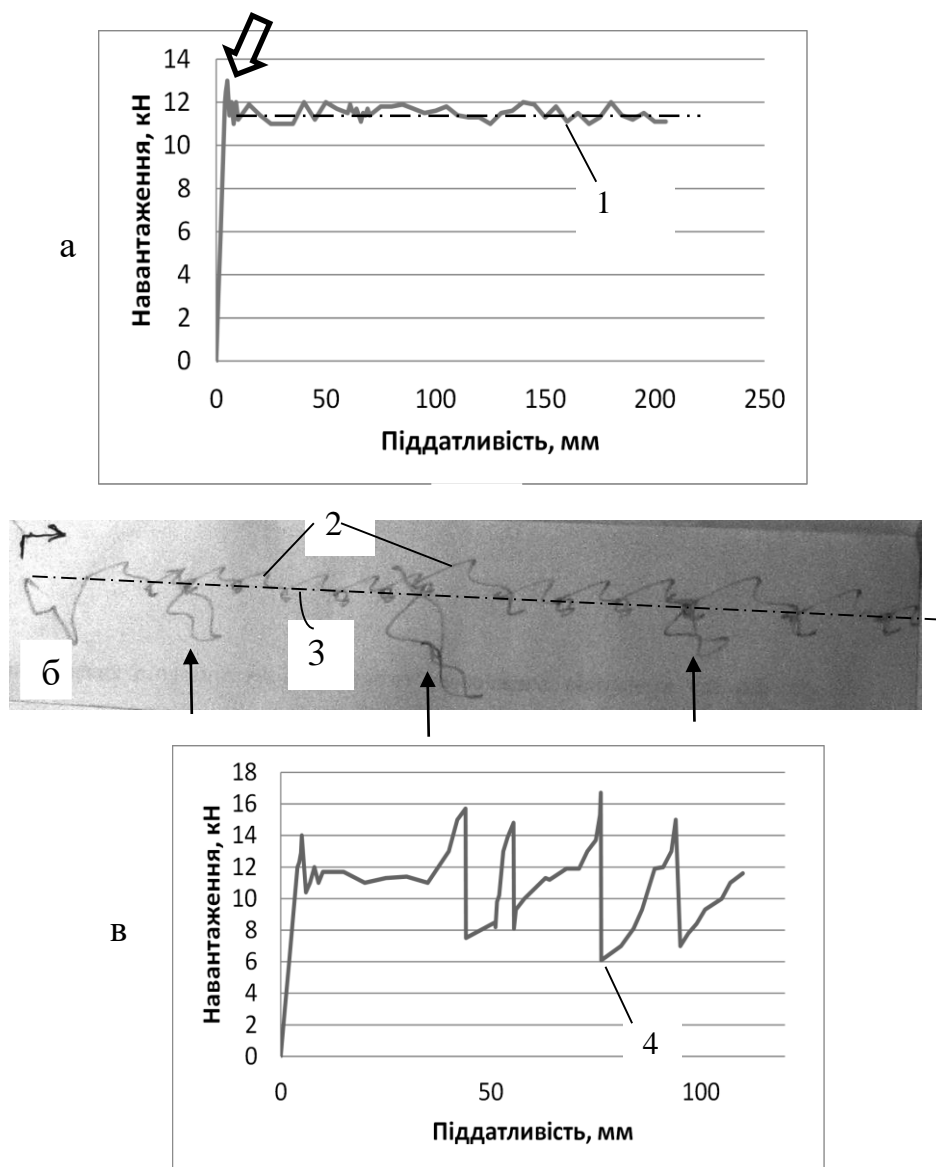


Рис. 2. Відновлення реального графіку еволюції опору замка під час реалізації його піддатливості

Вказана процедура не може бути реалізована простим інтегруванням, як це робиться у випадку відновлення траєкторії руху за допомогою інерційних систем [15]. Тому для відновлення опору рами необхідно прийняти певні гіпотези або припущення. Розглянемо графік опору стандартного замка піддатливості, отриманого на нахлестці прямолінійних стояків у лабораторних умовах

(рис. 3). Зауважимо, що випробувався *окремий* замок на прямолінійній нахлестці, а не на рамі. Відхилення важка від прямої лінії 3 на рис. 2,б відповідає моментам стрибкоподібного падіння опору замка на рис. 3. Як бачимо, піки опору не прив'язані до стандартного або нормативного рівня опору, який є приблизно постійним (у випадку замку постійного опору). Вказані піки можуть бути повністю розташовані над стандартним рівнем, або під ним. Це унеможливує надійне відновлення графіку опору піддатливого рамного кріплення за віброграмою рис. 2,б.

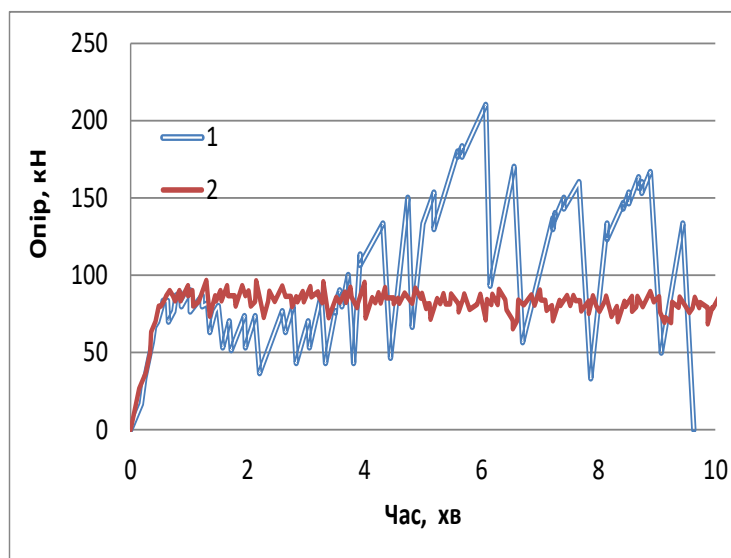


Рис. 3. Варіація опору окремих замків на прямолінійних стояках: 1 – стандартний замок АПЗ.030; 2 – ідеальна характеристика стабілізованого замка

Проте лабораторні випробування, виконані на системі кількох (хоча б двох) рам вказують на те, що коливання несучої спроможності рам відбувається відносно середнього рівня (рис. 4) [16]. Наприклад, розподіл випадкових відхилень опору чотирьох замків на двох суміжних рамах виявився симетричним зі стандартним відхиленням ± 12 кН від нормативного рівня опору.

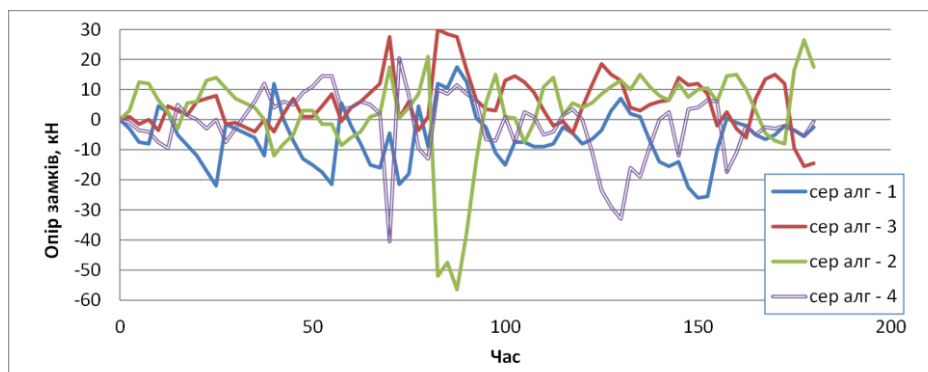


Рис. 4. Відхилення опору від середнього рівня на двох суміжних рамах

Такий експериментальний результат є наслідком закономірностей еволюції дисипативних систем [13] і дозволяє залучити закономірність симетричного відхилення величин опору рамного піддатливого кріплення відносно середнього рівня для розробки процедури відновлення динаміки опору рам за графіком відхилень важка.

Отже виходячи з обґрунтованої гіпотези щодо симетричності відхилень опору кріплення від стандартного рівня, доцільно виокремити таку амплітуду відхилень важка пружини самописця, енергія якої є значимою або суттєвою для того, щоб здійснити таке відхилення. Сім таких відхилень показані на рис. 3 починаючи з четвертої хвилини лабораторних випробувань замка піддатливості. Перші ж три відхилення, які відбулись з самого початку випробувань, як видно з графіку, залишились у межах випадкової похибки експерименту. Аналогічні флуктуації опору замка спостерігаються на висхідних гілках сплесків опору у діапазоні 5-6 хвилин випробувань, 7-8 та 8-9 хвилин. Таким флуктуаціям відповідає певна амплітуда відхилень важка, яка визначається з результатів калібровочних випробувань замків піддатливості

6. Обґрунтування алгоритму відновлення історії опору рами

Отже виконаний аналіз дозволив обґрунтувати наступний алгоритм відновлення графіку опору рамного піддатливого кріплення по результатам безперервного й одночасного моніторингу опору та піддатливості рам за допомогою розробленого пристрою. Нагадаємо, що для реалізації алгоритму необхідно попередньо отримати характеристику замка у лабораторних умовах і мати графік залежності опору від величини піддатливості в ідеальних умовах експлуатації замка. Тобто у таких (лабораторних) умовах, коли робота опору замка реалізується тільки у штатному, стандартному або проектному режимі.

Зауважимо також, що характеристика стандартного опору у лабораторних ідеальних умовах випробування і експериментальна діаграма відхилень важка самописця у шахтних умовах повинні буди побудовані у однакових координатах аргументу. Іншими словами вісь абсцис повинна вимірюватись у міліметрах, тобто відображати величину піддатливості. На осі ординат лабораторної або стандартної характеристики відображають опір замка у кілопаскалях, а на шахтній діаграмі – відхилення важка від нейтральної осі 3 у міліметрах (рис. 2,б).

Вказану діаграму отримують після погашення виробки або улюбий момент зняття стояку рами, на внутрішній поверхні якого буде накреслено графік відхилень важка (рис. 2,б). Стояк 3 рамного кріплення 1 знімають, його внутрішню поверхню очищають від вугільного пилу і бруду і фотографують слід, надряпаний маркером 19 у вигляді кривої рис. 2,б. Для прив'язки до масштабу цифровий знімок роблять з масштабною лінійкою, і для надійності додатково вимірюють рулеткою відстані між характерними коливаннями і відхиленнями на поверхні 14, які нанесені каліброваними ударами у якості

часових міток часу (вказані вертикальними стрілками на рис. 2,б). Таким чином навантаження можна відобразити як у залежності від величин піддатливості, так і від часу, що дуже важливо з точки зору синхронізації результатів моніторингу та їх порівняння у часі.

Величина одноразового відхилення важка й піддатливості не обов'язково пропорційні, оскільки одночасно з динамічною компонентою опору рами діє й статична компонента гірського тиску або навантаження на раму. Тому величина стрибка опору пропорційна саме відхиленню важка, а не його одноразовому (елементарному) пересуванню. Для встановлення залежності між відхиленням опору замка і відхиленням важка виконують спеціальні випробування у лабораторії, але створюють такі умови, коли замок може заклинюватись. У даному випадку відхилення опору замка ΔR знаходився у наступній параболічній залежності від величини відхилення d важка:

$$\Delta R = 1,74d^2 \quad (1)$$

Нагадаємо, що на шкалі вісі діаграми відхилень важка (рис. 2,б) відображена реалізація реальної піддатливості замка (рами). Наприклад, якщо певний стрибок важка у бік від лінії 3 (рис. 2,б) відбувся при абсцисі 75 мм, це означає, що на характеристиці замка (рис. 2,а) необхідно поставити вертикальну риску напроти абсциси 75 мм. Амплітуда rischi залежить від величини відхилення важка і визначається згідно формули (1). Наприклад відхилення важка у 8 мм відповідає відхиленню опору рами у шахтних умовах 111 кПа. Вертикальна риска ставиться так, щоб її середина співпадала з лінією 1 характеристики, яка відображена на рис. 2,а. Іншими словами пік опору рами у той момент склав $120+111/2=175,5$ кН, а після проковзування сегментів рами у результаті піддатливості замка опір упав до $120 - 55,5=64,5$ кН. Суміжні мінімуми опору й його максимуми з'єднуються прямими похилими лініями. За бажанням можна корегувати діаграму відхиленнями меншої амплітуди, які фактично несуттєво викривляють прямі відрізки діаграми (горизонтальні або похилі).

7. Врахування особливостей реальної поведінки рам у шахтних умовах

Піддатливі рами мають якнайменше два замка піддатливості. П'яти-ланцюгова рама має чотири таких замки і т.д. Для практики вкрай важлива задача полягає у дослідженні взаємної відповідності роботи замків піддатливості у часі і просторі. Справа у тому, що несинхронна піддатливість замків у часі і просторі призводить до перекошування рам і заклинювання замків з послідувальною втратою несучої спроможності рам. Для того, щоб мати можливість вирішувати вказану актуальну задачу, необхідно точно знати не тільки величину піддатливості кожного з замків на певній рамі і її опір, але й моменти спрацювання кожного з замків.

Для цього необхідно синхронізувати шкали піддатливості у часі. Іншими словами діаграми відхилення важка необхідно будувати як на шкалі піддатливості, так і у часовому масштабі. Нами запропоновано два способи часової синхронізації процесу піддатливості замків рами. Перший спосіб, активний, реалізується у будь-який момент часу шляхом нанесення каліброваного удару по рамі. Для надійної ідентифікації часових відміток удар здійснюється по центру верхняку, причому напрямку удару орієнтується уздовж вісі виробки. У результаті напрямку удару перпендикулярний напрямку динамічних імпульсів, які виникають під час спрацювання замків піддатливості, коли виникає суттєве відхилення опору рами від стандартного або нормативного штатного рівня. Таким чином фігура, яку описує важок з маркером має унікальну форму, яку можна ідентифікувати (дивись фігури, вказані вертикальними стрілками на рис. 2,б). Зрозуміло, що момент удару фіксують і запам'ятовують.

Другий спосіб синхронізації процесів піддатливості замків у межах однієї рами базується на тому, що у момент, коли спрацює один замок, вібрації рами розповсюджуються по усьому її периметру й так чи інакше зачіпають решту замків. Існує вагома підозра щодо практичної неможливості одноментного спрацювання усіх замків піддатливості у межах однієї рами. Ця думка підсилюється встановленими закономірностями еволюції дисипативних структур у часі і просторі [13]. Експериментальний доказ такої неможливості є задачею майбутнього, яку можна буде вирішити лише завдяки розробленому пристрою безперервного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення. Наразі ж треба відмітити, що форма фігур, які описує важок з маркером принципово відрізняються на активному замку (який піддається) і на пасивному, який буде тільки вібрувати разом з всією рамою. Попередні експерименти показують, що маркер на пасивному замку буде креслити прямий відрізок, що є перпендикулярним лінії 3 на рис. 2,б. Отже таким чином синхронізація буде доповнюватись ще й пасивною вібрацією замків, яка обумовлена спрацюванням активного замка.

Остання проблема, яку необхідно вирішити полягає у методі розрізнення ситуацій, коли активним елементом, який проковзує є верхняк, чи стояк. У переважній кількості випадків активне проковзування буде здійснювати верхняк. Зауважимо, що інерційна система відліку для рами й її конструктивних елементів зв'язана з земною кулею. Враховуючи реальну похибку механічних вимірів опору й піддатливості у важких підземних умовах прискоренням Коріоліса, що обумовлене обертанням Землі навколо своєї вісі можна знехтувати. Графік, зображений на рис. 2,б отриманий для найбільш представницького з точки зору теорії ймовірності випадку, коли активне проковзування здійснює верхняк, до якого жорстко прикріплена пружина.

Проте можливе й активне проковзування стояків внаслідок здимання підошви підземної виробки. У такому випадку на важок з маркером буде діяти тільки сила тертя, а отже фігура, яку опише маркер буде суттєво відрізнитись

від фігур, що виникають під час активного проковзування верхняку. Однак важливо те, що усі вказані фігури будуть мати унікальну форму, яку можна пов'язати з конкретною причиною. Таким чином принципово можливо відрізнити усі можливі акти прискорень елементів рамного кріплення: активного проковзування верхняку, стояку, пасивної вібрації рами, а також відхилення маркеру під час нанесення часових міток каліброваним ударом по рамі. Це забезпечує достовірність результатів відновлення реальної діаграми опору рамного кріплення у складних умовах підземної гірничої виробки.

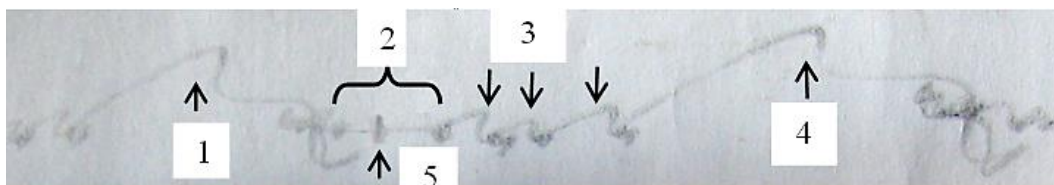


Рис. 5. Ілюстрація активної й пасивної реакції важка

Рис. 5 ілюструє переважну більшість характерних паттернів вібрацій. Паттерни 1 і 4 відображають активну реакцію важка на сильні динамічні ефекти, що супроводжували проковзування верхняку, на торці якого закріплено пружину з цим важком. Інтервал 2 вказує на просте пересування верхняку відносно стояку. Це пересування було рівномірним, без будь-яких прискорень. Тому лінія, прокреслена маркером є прямою і проходить через точки, де важок з пружиною знаходиться у рівноважному стані. Паттерн 3 ілюструє незначні коливання важка, які відображають малі прискорення верхняку, за яких відхилення величини опору було несуттєвим. Паттерн 5 показує пасивне здригання важка, який прокреслив вертикальну риску під час спрацювання протилежного (*чужого* для важка) замка.

Надійність методу гарантується чисто механічним способом моніторингу опору й піддатливості рами, простотою конструкції пристрою для реалізації вказаного способу, захистом пристрою від механічних пошкоджень у глибині спецпрофілю, повною відсутністю необхідності забезпечення пристрою енергією, яку він черпає від енергії гірського тиску. До того ж практичний досвід показав, що надійну діаграму креслить голка маркеру на смузі з акрил-вінілового оргскла, яку можна прикріпити до внутрішньої поверхні днища стояків саморізами. Акрил не піддається корозії, але достатньо пластичний, що сприяє нанесенню подряпуванням лінії. Додамо, що розроблений спосіб і пристрій для його реалізації має максимально можливий діапазон вимірювання піддатливості рами, який залежить тільки від довжини стояків і верхняку.

Вказаний механічний принцип вимірювання також індиферентний до агресивних підземних вод, стрибків температури, пилу. До того ж він не потребує електричного живлення, й нагляду. Це гарантує високу надійність безперервного моніторингу навантаження на рамне кріплення і його піддатливості.

Оскільки графік навантаження й піддатливості запам'ятовується повністю, без пропусків й втрати даних, це підвищує й достовірність результатів моніторингу.

Варто зауважити, що форму фігур, які креслить маркер суттєво залежить від кількох параметрів, а саме: від форми пружини, маси важка, сили притискування маркеру до внутрішньої поверхні днища стояку (або жорсткості пружини), кута нахилу лінії, що з'єднує точку прикріплення пружини до верхняку та вісь маркеру, відстані між вказаними точками, міцністю шару, на який наноситься діаграма. На рис. 6 наведено іншу форму діаграми, яка отримана пристроєм з дещо різними параметрами.

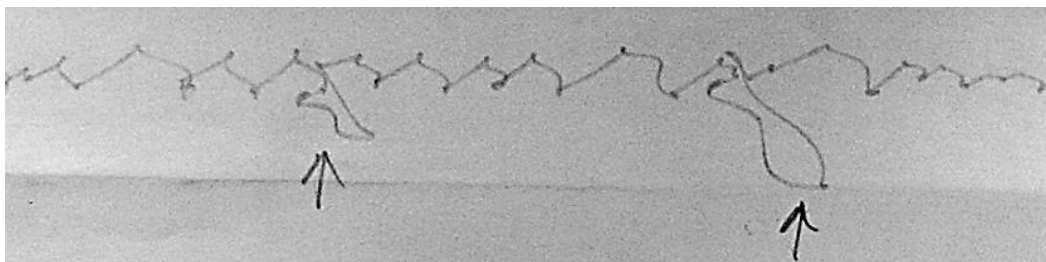


Рис. 6. Траєкторія руху маркеру за інших параметрів пружини й важка

Експериментальним шляхом визначені раціональні діапазони вказаних параметрів, що забезпечують суттєво різну форму фігур, які викреслює маркер, та їх розміри, що сприяє надійному розрізненню характерних ситуацій і у підсумку достовірності відновлення еволюції опору й піддатливості рамного кріплення у шахтних умовах.

Значення вказаних діапазонів для спецпрофілів СВП27 і СВП33 є наступними: жорсткість пружини становить 110-150 Н/м, маса важка знаходиться у діапазоні 0,05-0,10 кг, сила притиснення маркеру до внутрішньої поверхні днища спецпрофілю стояку становить від 1 до 2 Н, відстань між одним і другим кінцями пружини складає 0,8-1,25 ширини днища спецпрофілю, кут нахилу лінії що проведена через передній і задній кінець пружини і поздовжньою віссю спецпрофілю стояка має величину у діапазоні 40-70°.

Подальшими дослідженнями планується визначити оптимальні параметри пристрою й методики відновлення опору й піддатливості рамного кріплення. Для вирішення вказаної задачі буде застосовано сучасні методи штучного інтелекту й обробки образів.

Висновки

На основі встановлених закономірностей еволюції дисипативних структур у рамному піддатливому кріпленні та оточуючому масиві гірських порід обґрунтовано нові принципи безперервного й одночасного моніторингу опору й піддатливості рамного кріплення. Розроблено й випробувано конструкцію

пристрою для реалізації вказаних пристроїв. Встановлено раціональні параметри пристрою й розроблено алгоритм відновлення діаграми опору рамного кріплення й його піддатливості як у часі, так і просторі, які забезпечують високу достовірність результатів.

Надійність методу гарантується суттєвими перевагами, а саме: чисто механічним способом моніторингу опору й піддатливості рами, простотою конструкції пристрою для реалізації вказаного способу, захистом пристрою від механічних пошкоджень у глибині спецпрофілю, повною відсутністю необхідності забезпечення пристрою енергією, яку він черпає від енергії гірського тиску. Додамо, що розроблений спосіб і пристрій для його реалізації має максимально можливий діапазон вимірювання піддатливості рами, який залежить тільки від довжини стояків і верхняку.

Вказаний механічний принцип вимірювання також індиферентний до агресивних підземних вод, стрибків температури, пилу. До того ж він не потребує електричного живлення, й нагляду. Це гарантує високу надійність безперервного моніторингу навантаження на рамне кріплення і його піддатливості. Оскільки графік навантаження й піддатливості запам'ятовується повністю, без пропусків й втрати даних, це підвищує й достовірність результатів моніторингу.

1. *Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Снігур В.Г.* Аналітико-експериментальні дослідження стійкості виїмкових виробок і розрахунок параметрів кріпильної системи: монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2013. – 178 с.
2. *Шашенко О.М., Солодянкін О.В., Мартовицький А.В.* Управління стійкістю протяжних виробок глибоких шахт. Монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. – 384 с.
3. *Lubosik Z., Prusek S., Wrana A., Walentek A.* (2015). Underground Measurement of Gateroad Stability at the Depth Around 1000m. 34th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WVU. – Pp. 1-9.
4. *Prusek, S., Lubosik, Z., Dvorsky, P., Horak, P.* (2011). Gateroad support in the Czech and Polish coal mining industry – present state and future developments. In: Proceedings of the 30th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WVU. – Pp. 31-37.
5. *Meng Q., Han L., Chen Y., Fan J.* (2016) Influence of dynamic pressure on deep underground soft rock roadway support and its application. International Journal of Mining Science and Technology, Vol.26, # 5, Pp. 903-912
6. *Ming L., Xianbiao M., Yuanlin Y., Kai L.O., Chao M., Yan P.* (2012). Stress and deformation analysis on deep surrounding rock at different time stages and its application. International Journal of Mining Science and Technology. Vol. 22, # 3, Pp. 301-306.
7. *Stahlmann, J., Missal, C., & Edel T.* (2013). Geotechnical conditions at the Konrad mine – Excavation of drifts and rooms in squeezing rock. Geotechnische Bedingungen

- in der Schachtanlage Konrad – Auffahrung von Strecken und Kammern in druckhaftem Gebirge. Mining Report, 150 (5), 250–338, DOI: 10.1002/mire.201400029.
8. Способ шахтных замеров нагрузки на шахтную крепь: пат. 840353 СРСР. №2770265/22-03; заявл. 22.05.79; опубл. 23.06.1981, Бюл. №23. 2 с.
 9. Способ измерения нагрузки на крепь горной выработки: пат. 912946 СРСР. №2851685/22-03; заявл. 13.12.79; опубл. 15.03.1982, Бюл. №10. 2 с.
 10. Динамометрическая затяжка: пат. 459600 СРСР. №1666181/22-03; заявл. 18.06.71; опубл. 05.02.75, Бюл. №5. 2 с.
 11. *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.
 12. *Griniov V., Zakharova L., Diedich I., Nazymko V.* Distant interaction of rock mass clusters around underground opening. Min. miner. depos. 2017, 11(2): 79-83, <https://doi.org/10.15407/mining11.02.079>
 13. *Zakharova L.* (2017) Generating of dissipative structures during ground irreversible movement. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 8(6): 76-81.
 14. *Альтшицулер Г.С.* Алгоритм изобретения. М.: «Московский рабочий», 1969. – 63 с.
 15. *King A.D.* (1998). "Inertial Navigation – Forty Years of Evolution" (PDF). GEC Review. General Electric Company plc. 13 (3): 140–149.
 16. *Халімендик Ю.М., Халімендик В.Ю., Захарова Л.М.* Аналіз результатів стендових випробувань рамного кріплення. Науковий вісник НГУ. – 2017 (стаття знаходиться у процесі друкування).

Л.М. Захарова, В.Г. Гринёв, И.А. Дедич, М.Э. Гордиенко, А.Б. Кусень, Э.В. Френтцель., В.В. Назимко

РАЗРАБОТКА СПОСОБА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА СОПРОТИВЛЕНИЯ РАМНОЙ КРЕПИ И ЕЁ ПОДАТЛИВОСТИ

Разработан способ, обеспечивающий возможность непрерывного мониторинга податливости рамной крепи и её сопротивления горному давлению в течение всего срока эксплуатации выработки. Разработана конструкция устройства для надежной реализации способа и подобраны ее рациональные параметры. Проведен анализ результатов испытания новой технологии и поставлены задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: рамная крепь, податливость, динамика горного давления, мониторинг.

L. Zakharova, V. Griniov, I. Dedich, M. Gorgienko, A. Kusen, E. Frentsel, V. Nazimko

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CONTINUOUS MONITORING OF FRAME STRIP RESISTANCE AND ITS PLIABILITY

We developed a method providing continuous monitoring of frame support pliability and resistance to ground pressure during the term of its service. This method provides continuous and instantaneous monitoring of the pliability as well as frame of the support. The method spends no extra energy and drivers. This method has been implemented in practice owing a special design construction. The device is safe and reliable because pure mechanical approach was adopted during its development. Optimal parameters have been chosen to provide reliable functioning of the gage. We described the results of the gage testing in laboratory conditions. A set of tasks were delineated that should be accomplished during further investigation.

Keywords: frame support, pliability, dynamics of rock pressure, monitoring.