

Національна академія наук України
Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова

КРАСОВСЬКИЙ Ігор Св'ятославович

УДК [622.02:539.2/8:681.5]:622.349.5 (043.3)

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБКА ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО
КОНТРОЛЮ ГЕОМЕХАНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ
«АНКЕР – МАСИВ ГІРСЬКИХ ПОРІД»**

05.15.09 – «Геотехнічна та гірничча механіка»

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро - 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України (м. Дніпро).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Скіпочка Сергій Іванович, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, завідувач лабораторії фізики і геомеханічного моніторингу масивів гірських порід.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Ілліч, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри гірничої інженерії та освіти
кандидат технічних наук
Федько Михайло Борисович, Криворізький національний університет Міністерства освіти і науки України, доцент кафедри підземної розробки родовищ корисних копалин

Захист дисертації відбудеться « 18 » грудня 2020 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2 А, тел. / факс (056) 746-24-26.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Сімферопольська, 2 А.

Автореферат розісланий « 17 » листопада 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

В.Г. Шевченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Ефективність і безпека – основні складові вимог до галузі з видобутку твердих корисних копалин, яка знаходиться серед «лідерів» по кількості аварій, важкості праці, за обсягами капіталовкладень і складності інфраструктури підземного виробництва. Одна з основних складових, що визначають вищевказані недоліки, є геомеханічний стан системи “масив гірських порід – гірничі виробки – кріплення та охоронні конструкції”. Якщо виключити людський фактор, то частка геомеханічних негараздів, що призводять до аварій і нещасних випадків, становить, за різними оцінками, 70-80 %. Суттєво впливає геомеханіка масиву і на обсяги виробничих витрат. Наприклад, щорічне зведення і підтримання гірничих виробок тільки однієї шахти, що видобуває біля 2 млн тонн вугілля, коштує від 200 до 300 млн грн.

Зменшити вказані витрати та підвищити безпеку виробництва можливо шляхом оптимізації технології кріплення підземних виробок при одночасному впровадженні системного моніторингу їх геомеханічного стану. На сьогодні найбільш прогресивною є технологія анкерного кріплення, яка охоплює більшість виробок залізорудних і нерудних шахт, майже половину дільничних виробок вугільних шахт, широко використовується в “новоавстрійському” та інших методах спорудження цивільних об’єктів (метро, транспортних тунелів, підземних сховищ) тощо. Однак у анкерного кріплення є два суттєвих недоліки. По-перше, високі вимоги до дотримання технології зведення, особливо до таких параметрів як: швидкість зведення, довжина і кут нахилу анкера, діаметр шпуру, характеристика в’язучого, його кількість, рівномірність заповнення і герметичність шпуру, оскільки від цього залежить сила зчеплення анкера з масивом (міцність закріплення), його несуча здатність і, як наслідок, стійкість виробки. Другий суттєвий недолік анкерного кріплення – неможливість візуального контролювання його стану (на відміну, наприклад, від рамно-аркового або інших типів відкритого кріплення).

Основними показниками якості анкерного кріплення є міцність закріплення, що характеризує зчеплення анкера з масивом, та допустиме навантаження на анкер. В практиці гірничої справи періодично використовуються методи контролю анкерного кріплення, в основі яких – визначення зусилля його механічного висмикування. Цей метод дієвий, однак може використовуватися тільки для вибіркового контролю, оскільки відноситься до класу руйнівних методів і передбачає розанкерування масиву. Існуючі неруйнівні методи контролю анкерів, які розроблені, наприклад в США, Росії і інших країнах, вирішують проблему тільки частково з наступних причин. По-перше, вони переважно використовують як інформативний параметр спектральний склад коливань анкера, що суттєво ускладнює апаратуру і методику обробки інформації, тому застосовуються в основному для дослідницьких робіт або вибіркового контролю. По-друге, мають низький рівень захищеності від перешкод акустичного характеру, які постійно супроводжують гірниче виробництво. По-третє, в разі використання ультразвукового методу, не дозволяють оцінювати міцність закріплення анкера, а тільки його навантаження, оскільки контролюють тільки стан металу. Крім того, більшість розробок не передбачають автоматичне накопичення та статистичну

обробку даних, що вкрай важливо для поліпшення ергономічних показників, зменшення похибки оцінки стану кріплення при ненормованих зусиллях збудження коливань та при системному моніторингу стану виробок.

Тому вдосконалення методу і розробка засобів неруйнівного контролю геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід”, на основі визначення інформативного параметра та встановлення його залежності від характеристик вказаної системи, які б дозволяли оперативно в режимі моніторингу оцінювати міцність закріплення анкера в масиві в умовах гірничих виробок діючого виробництва є актуальним **науковим завданням**, що спрямоване на підвищення ефективності і безпеки підземного видобутку твердих корисних копалин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних тем ІГТМ НАН України: №ІІІ-65-15 “Розвиток теорії та методів керування станом геотехнологічних систем для забезпечення інтенсифікації роботи гірничодобувних підприємств”, № держреєстрації 0115U002534; №ІІІ-69-17 “Розвиток наукових основ та вдосконалення методів і засобів підвищення ефективності та безпеки ведення гірничих робіт при видобутку уранових руд”, № держреєстрації 0117U004231; №ІІІ-72-19 “Наукові засади ризик-орієнтованого керування геотехнічними системами при розробці родовищ твердих корисних копалин”, № держреєстрації 0119U001349; №ІІІ-68-16 “Розробка наукових основ екологічно безпечної доробки кар’єрів із використанням енергії вибуху і формуванням промислово-господарних комплексів на порушених та техногенних геологічних середовищах”, № держреєстрації 0116U004044, в яких автор був виконавцем.

Мета і завдання досліджень.

Мета роботи: на основі визначення інформативного параметра оцінки геомеханічного стану системи «анкер – масив гірських порід» та встановлення його залежності від характеристик навантаження і міцності закріплення анкера в масиві вдосконалити метод і розробити засіб оперативного, в режимі моніторингу, неруйнівного контролю вказаної системи для підвищення безпеки гірничого виробництва.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні **задачі**:

- провести аналіз розробок в області неруйнівного контролю стану анкерного кріплення;
- для визначення інформативного параметру, виконати теоретичні дослідження ударно-хвильових процесів в системі “анкер – закріплюючий шар – масив гірських порід” та розробити алгоритм первинної обробки результатів натурних спостережень;
- розробити методику і оснащення для фізичного моделювання ударно-хвильових процесів в системі “анкер – масив гірських порід”;
- виконати експериментальні дослідження ударно-хвильових процесів в геомеханічній системі “анкер – масив гірських порід” та обґрунтувати інформативний параметр неруйнівного контролю показників якості закріплення анкерів;
- вдосконалити метод і розробити апаратуру ударно-хвильового контролю геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід”;
- в умовах підземних споруд виконати апробацію методу і апаратури ударно-хвильового контролю геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід”;

розробити та впровадити методичне керівництво з неруйнівного контролю анкерного кріплення гірничих виробок шахт і рудників.

Об'єкт досліджень – геомеханічні та ударно-хвильові процеси в системі “анкер – масив гірських порід”.

Предмет досліджень – закономірності зміни інформативного параметра ударно-хвильового контролю геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід”.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод досліджень, що включає: аналіз і узагальнення розробок в даній галузі науки і техніки; теоретичні дослідження, що базуються на теорії коливань і методах математичної статистики; фізичне моделювання; лабораторні та натурні експериментальні дослідження з використанням промислових і дослідних зразків обладнання та апаратури.

Наукові положення, що виносяться на захист:

- вимогам оперативності з можливістю моніторингу геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід” найбільш задовольняє ударно-хвильовий метод неруйнівного контролю, що реалізується шляхом нанесення ненормованого удару по торцю анкера з реєстрацією та частотною селекцією вільних коливань і визначенням ступеня їх загасання в низькочастотній ділянці спектру, при цьому зі збільшенням ступеня закріплення анкера падає добротність коливальної системи, в наслідок чого зростає коефіцієнт загасання, і, відповідно, зменшується обернено пропорційна величина - час релаксації (параметр τ), яка є оптимальним інформативним параметром за показниками інформативності та ергономічності контролю;

- міцність закріплення в масиві анкерів довжиною від 1,2 до 2,7 м та їх натяг однозначно впливають на час релаксації загасаючого коливального процесу в системі «анкер – породний масив» в частотному діапазоні від 0,2 до 1,1 кГц, при цьому в межах вказаної ділянки спектру залежність часу релаксації від міцності закріплення анкера близька до обернено пропорційної, та є такою, що лінійно знижується зі зростанням сили натягу.

Наукова новизна отриманих результатів:

- подальший розвиток отримав метод неруйнівного контролю якості закріплення анкера, що базується на аналізі його власних коливань після ударного збудження і відрізняється використанням в якості інформативного параметра часу релаксації вільних коливань;

- теоретико-експериментальними дослідженнями вперше встановлено кількісні закономірності зменшення часу релаксації вільних коливань анкера при зростанні його площі контакту з масивом через закріплюючий шар та при збільшенні величини натягу.

Наукове значення роботи полягає у розвитку існуючих уявлень про особливості ударно-хвильових процесів в системі “анкер – масив гірських порід”, теоретико-експериментальному обґрунтуванні закономірностей, що пов'язують параметри загасаючого коливального процесу анкера з його довжиною та характеристиками натягу і міцності закріплення (зчеплення з середовищем).

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено та випробувано в лабораторних та промислових умовах апаратуру неруйнівного контролю геомеханічного стану системи «анкер – масив гірських порід», яка дозволяє оперативно оцінювати якість закріплення анкера в масиві та його навантаження в умовах гірничих виробок діючого виробництва, зокрема, і в режимі системного моніторингу;

2. Розроблені стенди для фізичного моделювання ударно-хвильових процесів в системі “анкер – закріплюючий шар – породний масив” для анкерів довжиною від 1,0 до 2,7 м з різними умовами натягу та закріплення, апаратури для оцінки сили удару та збудник коливань спеціальної конструкції;

3. Розроблено і затверджено компанією “ДТЕК ЕНЕРГО” “Методичне керівництво з неруйнівного контролю анкерного кріплення гірничих виробок шахт і рудників” (від 19 жовтня 2018 р.).

Реалізація результатів досліджень.

Розроблені методика і апаратура були використані при вирішенні конкретних гірничо-технологічних задач, які стосуються технічної діагностики стану гірничих виробок з анкерним кріпленням, зокрема, гіпсової шахти ОДО “Сініат” (м. Бахмут) (акт, програма та методика дослідно-промислових випробувань від 27 грудня 2016 р.; довідка від 26 жовтня 2020 р.), штолень і похилих стовбурів Новокриворізького гірничозбагачувального комбінату компанії “Арселорміттал” (м. Кривий Ріг) та апробовані у вугільній шахті “Тернівська” ДТЕК “Павлоградвугілля” (м. Тернівка) (довідка від 24 січня 2020 р.). Розробка включена обов'язковою складовою частиною контролю стійкості виробок гіпсової шахті ТДВ “Сініат” і використовується в процесі щоквартального моніторингу їх геомеханічного стану.

Обґрунтованість і достовірність положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи забезпечується: використанням фундаментальних положень теорії коливань та методів математичної статистики; фізичним моделюванням; достатнім обсягом натурних і лабораторних експериментальних досліджень, виконаних апробованими методами контролю із застосуванням стандартних засобів з апаратурною похибкою 2-5 %; задовільною збіжністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень (розбіжність не перевищує 20 %); позитивними результатами апробації розробок в натурних умовах.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано мету і задачі досліджень, основні наукові положення роботи, висновки і рекомендації, програму лабораторних і натурних експериментів, розроблено методику і проаналізовано результати досліджень, обрано напрямок теоретичних досліджень; самостійно виконано теоретичне обґрунтування покращення алгоритму первинної обробки даних та створено відповідне програмне забезпечення для розробленого засобу неруйнівного контролю анкерного кріплення. Автор брав безпосередню участь у обґрунтуванні математичної моделі системи «анкер – закріплюючий шар – масив», аналізі результатів моделювання, проведенні лабораторні досліджень на стендах, розробці методики і апаратури, та її апробації в натурних умовах. Зміст дисертації викладено автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на XIII-й і XIV-й конференціях молодих учених

“Геотехнічні проблеми розробки родовищ”, 2015, 2016 рр. (м. Дніпро), II-й Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції “Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі”, 2017 р. (м. Кривий Ріг), XII-й Міжнародній науково-практичній конференції “Школа підземної розробки”, 2018 р. (м. Бердянськ), XIII-й науково-практичній конференції “Ukrainian School of Mining Engineering”, 2019 р. (м. Дніпро).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 15 роботах, 8 з яких – в фахових наукових виданнях (3 – у виданнях, що зареєстровані в міжнародних наукометричних базах), 5 – патенти України, 4 – матеріали міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів і висновків. Містить 200 сторінок машинописного тексту (обсяг основного тексту – 156 сторінок), в тому числі 60 малюнків, 17 таблиць, 59 формул, включаючи список використаних джерел з 105 найменувань і 6 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі виконано аналіз сучасних методів і засобів кріплення гірничих виробок шахт і рудників. Встановлено, що на цей час найбільш розповсюдженим і прогресивним є анкерне кріплення. Однак, при чисельних позитивних якостях анкерне кріплення має ряд недоліків. По-перше, це високі вимоги до дотримання технології зведення (швидкість зведення, довжина і кут нахилу анкера, діаметр шпуру, характеристика в'язучого матеріалу, його кількість, рівномірність заповнення, герметичність шпуру), оскільки від цього залежить сила зчеплення анкера з масивом, його несуча здатність і, як наслідок, стійкість виробки. Другий суттєвий недолік – складність візуального контролю його стану (на відміну, наприклад, від рамно-аркового та інших типів візуально доступного кріплення).

В практиці гірничої справи періодично використовуються методи контролю анкерного кріплення, в основі яких, наприклад, визначення зусилля його механічного висмикування або сигнальні пристрої зміщення анкера. Ці методи дієві, однак можуть використовуватися тільки для вибіркового контролю, оскільки відносяться до класу руйнівних методів і передбачають розанкерування масиву, або лише констатують факт порушення кріплення. Існуючі неруйнівні методи діагностичного контролю анкерів (за західною термінологією – анкерних болтів), що розроблені, наприклад, в США, Росії і інших країнах, вирішують проблему лише частково з наступних причин. По-перше, вони використовують як інформативний параметр спектральний склад коливань анкера, що суттєво ускладнює апаратуру і методику обробки інформації, тому застосовуються в основному для дослідницьких робіт або вибіркового контролю. По-друге, мають низький рівень захищеності від перешкод акустичного характеру, які постійно супроводжують гірниче виробництво. По-третє, не передбачають накопичення та статистичну обробку даних інформативного параметра, що вкрай важливо для поліпшення ергономічних показників та зменшення похибки вимірювань при ненормованих зусиллях збудження коливань.

За результатами аналізу було зроблено висновок про актуальність проблеми неруйнівного контролю анкерного кріплення гірничих виробок. Виявлено, що існує

ючі методи контролю мають такі недоліки як, непристосованість для масового контролю кріплення та проблеми з оперативною обробкою даних. Як перспективний, та такий, що підходить для шахтного моніторингу, виділено ударно-хвильовий метод.

Визначено мету роботи та сформульовано наукове завдання: на основі визначення інформативного параметра та встановлення його залежності від характеристик системи “анкер – масив гірських порід”, які б дозволяли оперативно в режимі моніторингу оцінювати міцність закріплення анкера в масиві в умовах гірничих виробок діючого виробництва, вдосконалити метод і розробити апаратуру неруйнівного контролю, яка спрямована на підвищення ефективності і безпеки підземного видобутку твердих корисних копалин.

В другому розділі виконано теоретичні дослідження ударно-хвильових процесів в системі “анкер – масив гірських порід” та адаптовані алгоритм первинної статистичної обробки даних і метод максимальної правдоподібності.

В основу фізики методу контролю якості закріплення і несучої здатності анкера покладено закономірності його взаємодії з масивом і коливальні процеси в системі “масив – закріплюючий шар – анкерне кріплення”, що викликані зовнішнім динамічним впливом. Як джерело такого впливу моделюється удар по торцю анкера. Спрощена модель динамічної взаємодії анкера з масивом через проміжне середовище в вигляді закріплюючого шару представлена на рис. 1.

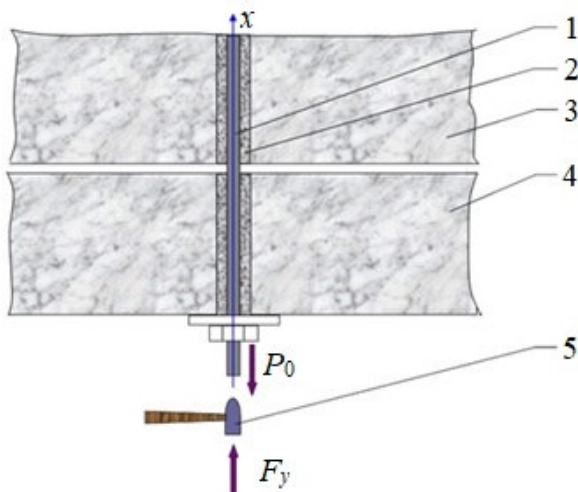
В модель закладено наступні параметри: маса m анкера, яка пропорційна його довжині l ; жорсткість k і в'язкість η закріплюючого шару; ударне зусилля F_y , збудження анкера уздовж осі X , зусилля розтягнення анкера P_0 .

Було розглянуто три види граничних умов защемлення анкера: на одному торці при відсутності закріплюючого шару; на обох торцях при відсутності закріплюючого шару; по всій довжині у в'язко-пружному середовищі.

В реальній ситуації мають місце позовжні коливання, які викликані геометрією і матеріалом самого анкера, або ті, що визначаються переміщенням анкера як абсолютно жорсткого стрижня в пружно-в'язкому середовищі. Спектральний склад частот першого виду коливань визначається виразами:

$$\omega_k = \frac{(2n+1)\pi V_p}{2l}; \quad \omega_k = \frac{n\pi V_p}{l}, \quad (1)$$

де ω_k – циклічна частота, c^{-1} ; V_p – швидкість позовжньої хвилі в анкері, м/с; l – довжина анкера, м; $n = 1, 2 \dots \infty$.



- 1 – анкер, 2 – закріплюючий шар,
- 3 – породний масив, 4 – відшарування,
- 5 – ударний збудник

Рисунок 1 - Модель динамічної взаємодії анкера з масивом гірських порід під час збудження коливань анкера

У випадку сталеполімерного чи залізобетонного анкера коливання стрижня у в'язко-пружному середовищі відбуваються значно складніше. У статичному положенні анкер розтягнуто зусиллям P_0 . При нанесенні удару анкер набуває початкову швидкість, вектор якої спрямований вздовж осі x . У протилежному напрямку будуть діяти в'язка сила опору, величина якої пропорційна поточній швидкості маси, що рухається, і довжині анкера l , а також пружна сила, величина якої пропорційна поточному зміщенню x . За рахунок цих сил швидкість буде зменшуватися, а напрямок прискорення має буде негативним по відношенню до орієнтації осі x . Після закінчення удару коливальний процес описується рівнянням:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta l \frac{dx}{dt} + kx = P_0, \quad (2)$$

де x – поточне зміщення анкера, м; m – маса анкера, кг; η – динамічна в'язкість закріплюючого шару, Па·с; l – довжина анкера, м; k – коефіцієнт жорсткості, Н/м; P_0 – статичне зусилля натягу анкера, Н.

Рішення (2) має вигляд:

$$x = \frac{P_0}{k} + c_1 e^{-\frac{\eta l}{2m}t} e^{-i\sqrt{\frac{4mk - \eta^2 l^2}{2m}}t} + c_2 e^{-\frac{\eta l}{2m}t} e^{i\sqrt{\frac{4mk - \eta^2 l^2}{2m}}t}. \quad (3)$$

Фізичний сенс першого доданка – статична пружна деформація розтягування анкера, яка визначається величиною попереднього натягу. Другий доданок є комплексною формою запису затухаючого коливального процесу анкера у в'язкому середовищі. Вираз в показнику експоненти має розмірність частоти, яка залежить від показника жорсткості k та коефіцієнта в'язкості η . Вказані параметри зменшуються при погіршенні якості закріплення.

Таким чином, критерієм якості закріплення анкера в масиві з використанням закріплюючого шару може бути ступінь загасання власних позовжних коливань, що реєструється в анкері після його ударного збудження.

Для забезпечення можливості автоматичного накопичення та статистичної обробки результатів контролю було адаптовано алгоритм підвищення точності даних, що передбачає їх набір в одній точці вимірювання, з подальшою статистичною обробкою отриманих значень програмованою мікропроцесорною технікою, для оптимізації досліджень в залежності від попередніх вимог до достовірності контролю.

На першому етапі виконують попередньо задану кількість визначення значень інформативного параметра N_1 , зберігаючи інформацію про них в пам'яті пристрою. Після закінчення проміжного циклу виконується автоматичне визначення статистичних характеристик отриманої малої вибірки: середнього арифметичного значення параметра, середньоквадратичного відхилення малої вибірки, середньої абсолютної похибки малої вибірки, граничної абсолютної похибки малої вибірки $\Delta P_{1гр} = t\Delta P_1$. Коефіцієнт Стьюдента t в останньому виразі вибирають за спеціальними таблицями, задаючись відомою кількістю вимірювань N_1 і необхідної довірчою ймовірністю.

Далі визначають для отриманої вибірки граничну відносну похибку. Обчислену величину граничної відносної похибки порівнюють із заздалегідь заданою допустимою $\delta P_{1доп.}$. Якщо вона більше допустимої, то буфер пам'яті обнуляється, і вико-

нання поточного циклу припиняється. Процес починається знову за описаним вище алгоритмом. Якщо ж помилка менше, то отримана вибірка і результати її статистичної обробки зберігаються в пам'яті в якості першого наближення для подальшого поліпшення.

Кожне нове значення параметра P_i проходить перевірку на критерій 2σ . Якщо воно потрапляє в інтервал від $P_{1c} - 2\sigma$ до $P_{1c} + 2\sigma$, то поповнює первинну вибірку, в іншому випадку його відбраковують. При кожному додаванні нового i -го елемента в вибірку визначають величину граничної відносної помилки $\delta P_{i \text{ гр}}$ і порівнюють її із заданою кінцевою допустимою $\delta P_{\text{к.доп.}}$. Процес буде сходиться через поступове збільшення обсягу вибірки. Закінчення циклу визначається умовою: $\delta P_{i \text{ гр}} \leq \delta P_{\text{к.доп.}}$.

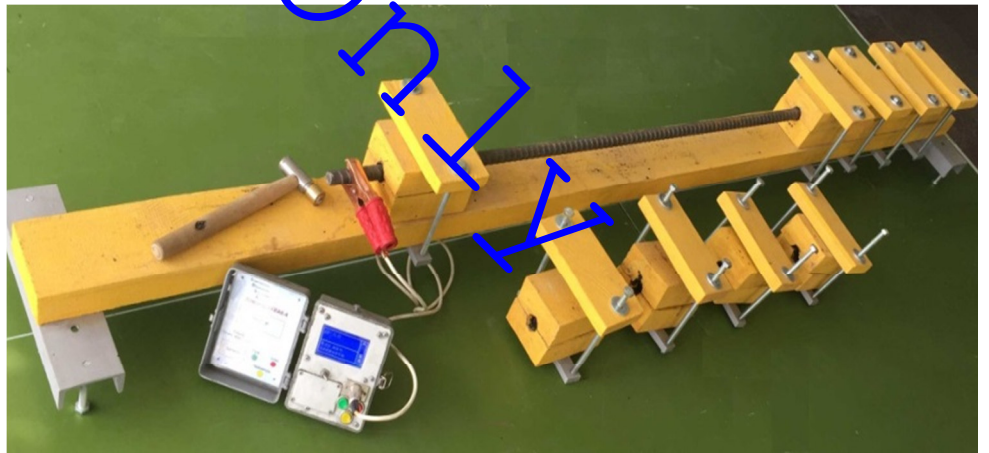
При виконанні зазначеної умови усереднене значення інформативного параметра виводиться на дисплей, а інші дані видаляються з оперативної пам'яті. Після цього пристрій готовий до нового циклу. Для оптимізації критеріальної оцінки стану кріплення використовується метод максимальної правдоподібності.

Теоретичне дослідження системи «анкер-закріплюючий шар – масив» визначило параметри загасяючих поздовжніх коливань анкера у пружно-в'язкому середовищі закріплюючого шару після його ударного збудження. Встановлено, що критерієм міцності закріплення може бути ступінь загасання власних коливань. Розроблено також адаптивний алгоритм обробки первинних даних для оптимізації співвідношення між оперативністю контролю та достовірності його результатів.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням ударно-хвильових процесів у геомеханічній системі «анкер – масив гірських порід». Для досліджень було розроблено методику, апаратуру та оснащення, на якому моделювали поведінку анкера в масиві. Зовнішній вигляд розроблених стендів представлено на рис. 2.



а.



б.

Рисунок 2 - Стенди для досліджень ударно-хвильових процесів в анкері в залежності від його натягу (а) і в анкері різної довжини в залежності від ступеня його зчеплення (б)

На першому етапі досліджень встановлено, що низькочастотні складові коливального процесу пов'язані з інерційністю системи «анкер – закріплюючий шар» і проявляються в сумарному спектрі коливань з певною затримкою відносно більш

високочастотних, що обумовлено високою швидкістю звуку в анкері. Завдяки цій інерційності коливання в низькочастотній ділянці спектру в цілому згасають повільніше. Ступінь загасання визначається величиною коефіцієнта згасання β , або його зворотною величиною (часом релаксації τ):

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2m}{\eta l} = \frac{C}{\eta}, \quad (4)$$

де C – стала величина, що визначається конструкцією та геометричними параметрами конкретного анкера.

Фізичний сенс часу релаксації – проміжок часу, на протязі якого величина амплітуди згасаючих вільних коливань зменшується в e разів. Основною позитивною властивістю даного параметра є його незалежність від початкової амплітуди коливань, яка залежить від сили удару.

На другому етапі вивчали вплив сили удару на параметр τ . Для цього було розроблено апаратуру, що дозволяє опосередковано оцінити силу удару по анкеру, яка представляє собою ударний п'єзоакселерометр, з'єднаний з рядом компараторів, що, в свою чергу, з'єднані з світлодіодним індикатором.

Дослідження показали, що сила удару слабо впливає на значення часу релаксації. При значному збільшенні сили удару (у 8 разів) час релаксації змінюється лише на 10 %. Для подальшої стабілізації удару було розроблено ударник спеціальної конструкції із сферичним бойком на пружині.

Дослідження залежності інформативного параметру від силу натягу анкера виявили майже лінійне зниження значення часу релаксації від натягу анкера (рис. 3).

Отримана залежність з задовільною точністю апроксимується функцією:

$$\tau/\tau_0 = -0,012F_n + 0,985 \quad (R^2 = 0,96). \quad (5)$$

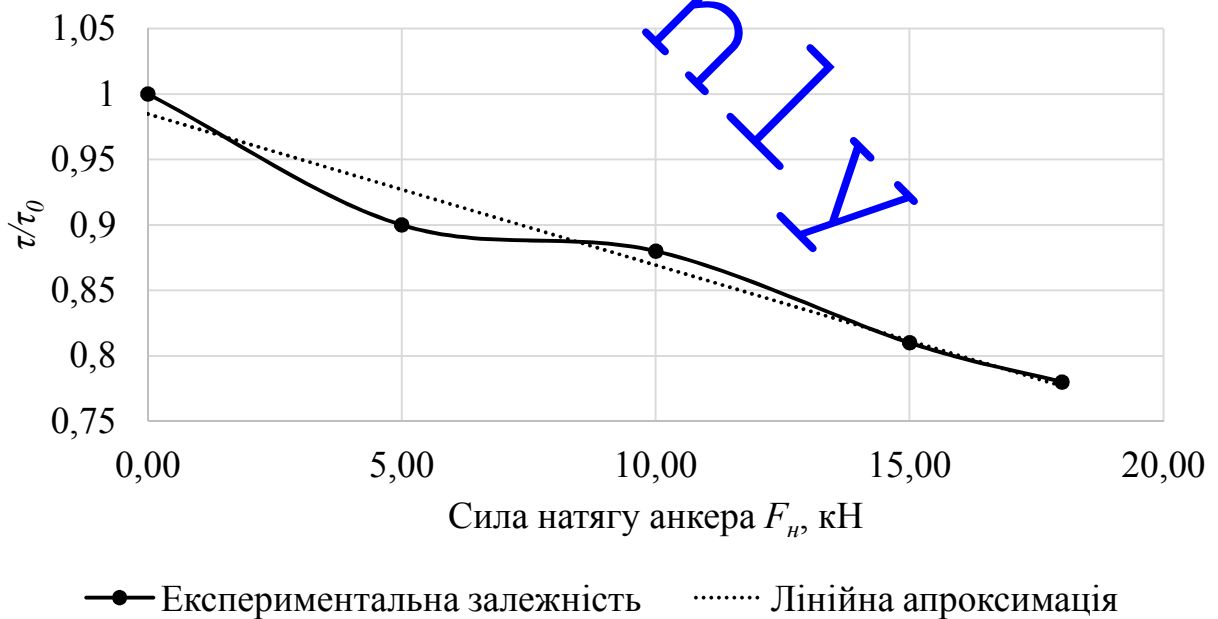


Рисунок 3 - Залежність між натягом анкера і відносною величиною інформативного параметра

Дослідження залежності інформативного параметру від ступеня зчеплення анкера з масивом також виявили зниження часу релаксації з ростом кількості ділянок зчеплення.

Отримана експериментальна залежність апроксимується функцією:

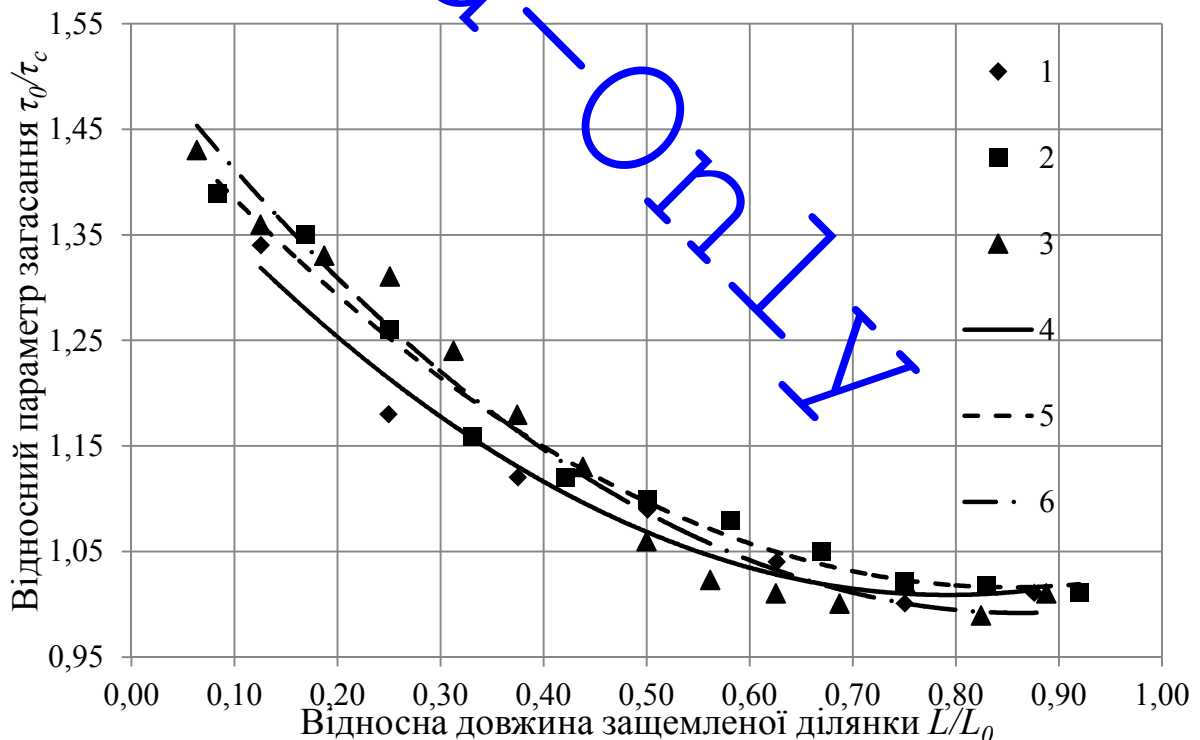
$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{A}{\frac{L}{L_0} + B}, \quad (6)$$

де (в даному випадку) $A = 7,7$; $B = 6,7$.

Результати експерименту з вивчення впливу довжини анкера на величину інформативного параметру показали наступне: початкове значення відношення характеристик загасання зростає зі збільшенням довжини анкера; при зростанні ступеня заземлення вказане відношення прагне до одиниці, незалежно від довжини анкера; зі збільшенням відносної довжини L/L_0 заземленої ділянки відношення часу загасання коливаний в задане число разів для анкера і стенду знижується по залежності, близькій до обернено пропорційної; з урахуванням одночасного використання анкерів різної довжини при кріпленні виробки можлива тільки якісна оцінка стану системи «анкер – породний масив».

Результати експерименту ілюструються графіками, наведеними на рис. 4.

Параметри апроксимуючих нелінійних залежностей для анкерів різної довжини (вираз (6)), наступні: для анкера довжиною 1,2 м – $A = 4,28$; $B = 3,28$; для анкера довжиною 1,8 м – $A = 2,65$; $B = 1,85$; для анкера довжиною 2,4 м – $A = 2,29$; $B = 1,60$.



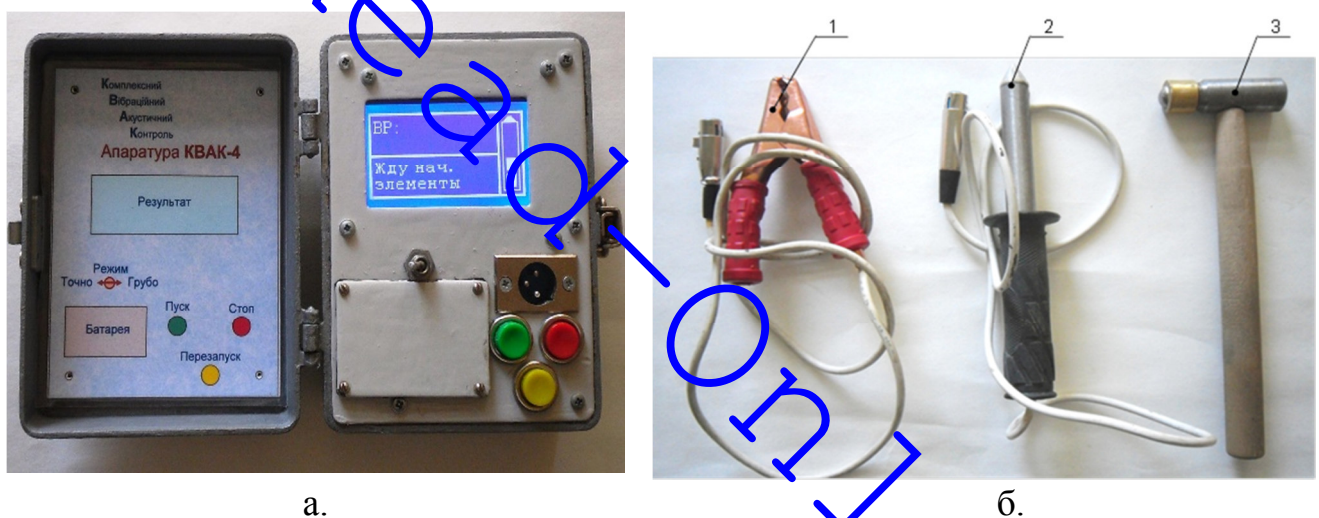
Експериментальні дані для анкерів довжиною: 1 – 1,2 м; 2 – 1,8 м; 3 – 2,4 м; теоретичні залежності для анкерів довжиною: 4 – 1,2 м; 5 – 1,8 м; 6 – 2,4 м

Рисунок 4 – Залежність відносного параметру загасання коливаний в анкері від відносної довжини ділянки його заземлення для анкерів різної довжини

В результаті експериментальних досліджень ударно-хвильових процесів в системі «анкер – масив гірських порід» встановлено залежності між характеристиками вільних коливань анкера та параметрами, що характеризують міцність його закріплення, а також величиною натягу анкера. За результатами комплексного аналізу результатів теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано вибір інформативного параметра, що характеризує міцність закріплення анкера – час релаксації вільних коливань.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження покладено в основу робочої методики та апаратури неруйнівного контролю стану системи «анкер – масив гірських порід». Результати цієї частини роботи, окремі результати апробації розробки та використання її для технічної діагностики підземних споруд, викладено в **четвертому розділі**.

Структурна схема апаратури комплексного віброакустичного контролю (КВАК) складається з блоку живлення, датчика коливань, блоку аналогової обробки сигналу, формувача частотної сітки, блоків керування циклом та індикації. Зовнішній вигляд апаратури КВАК-4 і комплектуючих елементів представлено на рис. 5.



1 – накидний датчик для реєстрації вібрації анкера; 2 – контактний датчик для реєстрації вібрації довільних конструкцій; 3 – ударний збудник коливань

Рисунок 5 - Зовнішній вигляд електронного блоку (а) і комплектуючих (б) апаратури КВАК-4

Основна відмінність апаратури КВАК-4 – наявність 8-ми бітного AVR мікропроцесора та SMD елементів, що дозволило зменшити розміри та масу апаратури, а також реалізувати можливість автоматичного накопичення та статистичної обробки результатів контролю. Оскільки апаратура орієнтована на використання і в умовах вугільної шахти, з її конструкції прибрані алюмінієві та пластмасові елементи, а корпус виконано сталевим. Елементи живлення поміщені в герметичний роз'ємний корпус, який при необхідності розкривають тільки поза шахтою. Змінена конструкція датчика для реєстрації. Первинний перетворювач вібрації покрівлі виконано на основі п'єзокераміки і поміщено в герметичний корпус з нержавіючої сталі. Це дозво-

ляє використовувати його при довільній орієнтації об'єкта контролю та в умовах високої вологості.

Згідно розробленої методики контроль анкерного кріплення виробок включає три етапи робіт. На першому етапі проводиться органолептична оцінка стану виробки, породного масиву, кріплення і системи «кріплення - масив» в цілому. На другому етапі ударно-хвильовим методом виконується оцінка якості закріплення анкерів та їх несучої здатності. На третьому етапі (при необхідності) здійснюється технічна діагностики стану комбінованого кріплення виробки.

Оскільки апаратура КВАК-4 розрахована на застосування спеціалізованого програмного забезпечення, наявність якого, окрім вказаних вище загальних операцій, обумовлює індивідуальні особливості підготовки до роботи. Перед початком роботи може виникнути потреба в перепрограмуванні пристрою, виходячи з конкретних завдань діагностики. Величинами, що допускають перепрограмування є об'єм N початкового масиву даних, довірна ймовірність α та допустима відносна похибка $\delta P_{\text{доп.}}$. Перепрограмування виконують з використанням комп'ютера, спеціального програматора та програмного забезпечення. Рекомендовані значення параметрів для типових ситуацій наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Програмовані параметри статистичної обробки даних

Параметр статистичної обробки	Завдання контролю		
	тарування	вибіркова оцінка	масова оцінка
N	8-10	5-7	5
α	0,95	0,90	0,80-0,90
$\delta P_{\text{доп.}}$	0,05	0,10	0,10-0,15

Для оцінки якості закріплення анкера методом неруйнівного контролю має бути виконане тарування для конкретного виду анкерів та технології їх закріплення. Завданням тарування є встановлення залежності між результатами неруйнівного та наступного руйнівного контролю. Ефективність тарування досягається одночасним підвищенням достовірності результатів як неруйнівного так і руйнівного контролю. В зв'язку з неможливістю повторних руйнівних випробувань анкера їх достовірність можна підвищити лише за рахунок збільшення кількості анкерів, що підлягають випробуванню. При неруйнівному контролі достовірність можна підвищити збільшенням кількості визначень інформативного параметра (табл. 1).

Методикою передбачено два види контролю – масовий та вибірковий.

Вибірковий контроль якості закріплення анкерів застосовують при великій кількості анкерів (за умови орієнтовної апріорної інформації, щодо процента невідповідності умовам приймання), за результатами візуального огляду закріпленої ділянки та на ділянках з неможливістю безпосереднього доступу до певної кількості анкерів.

Масовий (суцільний) контроль здійснюють при невеликій кількості анкерів на контрольованій ділянці (до 24 включно), на особливо відповідальних ділянках та при значному відсотку анкерів, що не відповідають проектним вимогам ($\geq 10\%$).

Вибірковий контроль має три рівні: нормальний ($Ac = 1$), посилений ($Ac = 0$), та послаблений ($Ac = 2$), де Ac – максимально допустима кількість дефектних оди-

ниць в вибірці. По замовчуванню, як основний, приймають нормальний контроль. У випадку, коли в послідовно контрольованих п'яти партіях анкерів дві не відповідають вимогам замовника, переходять на посилений контроль. Зворотнє перемикання з посиленого на нормальний виконують, коли послідовно проконтрольовані п'ять заанкерованих ділянок повністю відповідають вимогам замовника. Послаблений режим контролю виконують при усталеній технології кріплення в великих об'ємах виключно на вимоги замовника.

Для ділянок з кількістю анкерів до 24 включно виконують суцільний контроль. Великі закріплені ділянки, що містять понад 500 анкерів, ділять на окремі партії. Рекомендовані об'єми вибірок для послабленого, нормального і посиленого контролю для ділянок з різною кількістю анкерів наступні: ≤ 100 , відповідно 5, 8-13, 13-20; 100-300, відповідно 8-13, 20-32, 32-50; ≥ 300 , відповідно 20, 50, 80.

Вибірковий контроль може мати нижчу достовірність порівняно з таруванням. Параметри програмування для апаратури КВАК-4 для даного випадку наведено в табл. 1. Кількість визначень інформативного параметра в одній точці має становити не менше 8 після відкидання явно аномальних значень.

Окрім контролю якості закріплення анкерів, апаратура КВАК в обох модифікаціях дозволяє спостерігати за динамікою розвитку відшарувань в приконтурній зоні виробки, як на закріплених її ділянках, так і при відсутності кріплення. Окремою різновидністю даного виду контролю є виявлення ділянок відшарування набризкбетону при комбінованому кріпленні «анкер – набризкбетон». Фізичною основою такого контролю є збільшення добротності власних коливань породного чи бетонного шару, що втратив тісний механічний контакт з основним масивом. Наслідком є зростання величини часу релаксації.

Для даного виду контролю використовують контактний датчик з конічним концентратором. Визначають положення точки контролю. Контактний датчик для прийому вібрації притискають перпендикулярно до поверхні виробки на відстані близько 1 м від контрольованої точки. Після увімкнення апаратури наносять в точці контролю попередній удар для оцінки її працездатності. У випадку індикації результату, відмінного від нуля, апаратуру вважають готовою до роботи. В контрольованій точці наносять послідовну серію ударів. Кількість визначень інформативного параметра в одній точці відповідає умовам масового контролю.

При контролі в загальному випадку виділяють три градації стану системи «масив – відшарування»: монолітний зв'язок, явне відшарування та проміжний стан. Критеріальні значення для віднесення контрольованих точок до певної категорії знаходять шляхом тарування на експериментальних ділянках, де структура породного масиву наперед визначена шляхом контрольованого буріння. Методика тарувальних робіт аналогічна таруванню в натурних умовах.

Методика і апаратура були апробовані, а в подальшому використані при вирішенні конкретних гірничо-технологічних задач, які стосуються технічної діагностики стану гірничих виробок та інших підземних об'єктів з анкерним кріпленням, зокрема, гіпсової шахті ТДВ «Сініат» (м. Бахмут) та вугільної шахти «Тернівська» ДТЕК «Павлоградвугілля» (м. Тернівка), штолень і похилих стовбурів Новокриворізького гірничозбагачувального комбінату компанії «Арселорміттал» (м. Кривий Ріг).

Розробка включена обов'язковою складовою частиною систематичного контролю стійкості виробок гіпсової шахті і продовжує використовуватися в процесі щоквартального моніторингу їх геомеханічного стану.

На першому етапі апробація розробки в шахті передбачала:

- перевірку роботи електронного блоку і датчиків апаратури в шахті при комплексній дії несприятливих чинників;
- визначення можливості виявлення апаратурою ослабленого закріплення в масиві анкерів з механічним замком;
- визначення можливості контролю натягу ланок анкеро-стягувального кріплення (АСК);
- визначення можливості виявлення зон порушень монолітності породного масиву покрівлі камер.

Для кожного з видів обстежуваних елементів за сукупністю ознак відбиралися групи, що явно відрізняються категорією стійкості. При контролі елемента виконувалося не менше 10 визначень інформативного параметра з подальшим усередненням результатів. Для оцінки ступеня розкиду показань хоча б на одному з елементів обсяг вибірки збільшували до 30 результатів. Збудження коливань в анкерах і покрівлі виконувалося одним і тим же ударником.

Встановлено наступне:

- при відсутності прямого механічного контакту датчика з елементами кабіни телескопічного підйомника робота двигуна не заважає виконувати оцінку стану приконтурної зони породних відслонень;
- при відстанях, що перевищують 7 м, рівень вібрації масиву від працюючих верстатів нижче порога чутливості апаратури і не заважає її роботі;
- найбільш значним джерелом перешкод є поодинокі удари кувалдою по поверхні масиву, зона впливу яких складає 20-25 м.

Джерелом регулярних електромагнітних завад з промислової частотою були діючі верстати і підвішені силові кабелі. Імпульсні широкосмугові перешкоди завадалися також роботою зварювального устаткування. Була підтверджена висока ступень екранування апаратури. Наближення апаратури на відстань 1 м до діючого верстата і силового кабелю не викликало її запуску від електромагнітних наведень. При виконанні досліджень на зварювальному майданчику величина віддалення апаратури від місця зварювання за умовами безпеки склала близько 3 м. У цьому випадку теж не спостерігався випадковий запуск електричної схеми.

Програма і методика випробувань в умовах гіпсової шахти передбачала визначення можливості виявлення ослабленого закріплення анкерів з механічним замком, визначення можливості контролю натягу ланок АСК та визначення можливості виявлення зон порушень монолітності породного масиву покрівлі камер.

Для проведення випробувань було обрано 4 ділянки: на майданчику механічних майстерень №1; на головній транспортній галереї між ціликами 79-99, що закріплені анкерами і сіткою та між ціликами 83, 84, 102, 103, що закріплені АСК і в районі центрального водовідливу, між ціликами 132, 181, 213 з відсутнім кріпленням.

За даними випробувань, підтверджених актом спеціальної незалежної комісії, встановлена працездатність розробки та рекомендовано її впровадження як елементу постійного моніторингу стану гірничих виробок гіпсової шахти.

В рамках виконання науково-дослідних робіт з оцінки технічного стану гірничих виробок Новокриворізького гірничозбагачувального комбінату (ГЗК) компанії «Арселорміттал Кривий Ріг», розроблені методика і апаратура КВАК-4 були використані в процесі технічного огляду кріплення допоміжних штолен горизонтів -45 м і -85 м та похилих транспортних стовбурів ЛК-1Р, ЛК-1П ДФ №4 ГЗК, що закріплені комбінацією анкерів, набризкбетону і торкрету.

Для виявлення прихованих відшарувань набризкбетону використано контактний приймач вібрації з конічним концентратором. Його встановлювали на відстані 3 м перпендикулярно поверхні виробки із зусиллям притиску 30-50 Н в зоні впевненого прийому згинальних хвиль. При інтерпретації отриманих даних керувалися наступними критеріями:

- при значенні часу релаксації не більше 3 мс адгезія захисного покриття (набризкбетону, торкрету) задовільна;
- при значенні часу релаксації від 3 до 10 мс мають місце локальні порушення контакту захисного покриття з масивом;
- збільшення часу релаксації понад 10 мс свідчить про відшарування покриття на значній площі, як правило, не менше кількох квадратних метрів.

Загальна довжина обстежених виробок – понад 1800 м. За результатами технічної діагностики було підготовлено і передано замовнику висновки про технічний стан кріплення і армування транспортних стовбурів ЛК-1Р, ЛК-1П і допоміжних штоленб гор. -45 м і -85 м ЦПТ ДФ №4, рекомендації з ремонтно-відновлювальних робіт для забезпечення нормальної експлуатації і підвищення категорії гірничих виробок та паспорта технічного стану споруди.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі геотехнічної і гірничої механіки, в якій отримано нове рішення актуальної наукової задачі, що полягає у встановленні закономірностей, які пов'язують характеристики анкера та якості його закріплення в породному масиві з параметрами збуджених ударом загасаючих коливань анкера, обґрунтуванні інформативного параметру неруйнівного контролю натягу і міцності закріплення анкера та частотного діапазону його визначення; вдосконаленні на цій основі методу та розробці апаратури неруйнівного контролю геомеханічного стану системи «анкер – масив гірських порід» гірничих виробок діючого виробництва та інших підземних споруд; розробці та впровадженні методичного керівництва з неруйнівного контролю анкерного кріплення гірничих виробок шахт і рудників для підвищення безпеки та ефективності гірничих робіт.

Проведені дослідження дозволили одержати наступні наукові та практичні результати:

1. Аналіз методів і засобів моніторингу найбільш ефективного і поширеного в гірничій галузі анкерного кріплення показав, що сучасні методи контролю його стану або належать до руйнівних, перманентно виводячи анкер з робочого стану, або лише констатують факт втрати несучої здатності анкера, відзначаються низькою оперативністю та недостатнім рівнем обробки інформації на місці контролю. Як пе-

спективний неруйнівний метод виділено ударно-хвильовий. Для подальшого вдосконалення методу необхідне теоретичне та експериментальне вивчення хвильових процесів, що відбуваються в системі «анкер – закріплюючий шар – породний масив». У зв'язку з цим, розробка методів і засобів оперативного контролю стану системи «анкер – масив гірських порід» є актуальним науковим завданням.

2. Виконано теоретичні дослідження ударно-хвильових процесів в тришаровій системі «анкер – закріплюючий шар – гірський масив», що виникають в результаті ударного збудження анкера, для різних граничних умов та коливань анкера. Встановлено, що зменшення довжини анкера та збільшення в'язкості або довжини закріплюючого шару зменшують тривалість коливального процесу в системі, а зменшення жорсткості системи «анкер – масив», що фактично означає погіршення якості закріплення анкера, призводить до зменшення частоти поздовжніх коливань. Отримано аналітичні вирази, що описують встановлені закономірності. Обґрунтовано можливість використання ударно-хвильового методу для контролю стану системи «анкер – масив гірських порід». Метод базується на використанні в якості інформативного параметра часу релаксації затухаючого коливального процесу (інтервалу часу, протягом якого амплітуда вільних коливань зменшується в e разів). Розроблено алгоритм статистичної обробки первинних даних, що забезпечує відбракування аномальних значень та оптимізує об'єм вибірки. Відповідне програмне забезпечення створено для двох варіантів контролю: підвищеної достовірності контролю та підвищеної оперативності. Камеральна обробка отриманих даних передбачає використання методу максимальної правдоподібності.

3. Розроблено оснащення для фізичного моделювання ударно-хвильових процесів в системі «анкер – закріплюючий шар – породний масив» в складі двох стендів оригінальної конструкції, силовимірювача для контролю натягу анкера, пристрою для оцінки сили удару, та комплекту збудників удару. Оснащення передбачає дослідження з анкерами довжиною від 1,0 до 2,7 м. Розроблена також методика виконання експериментальних робіт. Стенд для дослідження впливу натягу та закріплення анкера на значення інформативного параметра захищено патентом України.

4. Виконано лабораторні дослідження ударно-хвильових процесів в системі «анкер – закріплюючий шар» при варіації довжини анкера, сили удару, натягу анкерного стрижня та відносної величини защемленої ділянки. Встановлено, що діапазон частот вільних коливань анкера при варіації вказаних параметрів знаходиться в межах від 0,2 до 1,1 кГц. В межах вказаного частотного діапазону час релаксації коливань при варіації міцності закріплення анкера в 8 раз змінюється в межах до 60 %, вказана залежність близька до обернено пропорційної, та є такою, що лінійно знижується на 23% зі зростанням сили натягу в межах 0 - 18 кН. Наявність кореляційного зв'язку між показниками, що характеризують якість закріплення анкера та часом релаксації вільних коливань обумовила його вибір в якості інформативного параметра. Встановлено, що розкид показань апаратури викликані мультичастотністю затухаючих коливань у системі «анкер – масив гірських порід». Розроблено математичну модель динамічної взаємодії металевого залізобетонного анкера з шаром закріплюючого матеріалу. Експериментально встановлено, що співвідношення часу релаксації вільних коливань анкера та прилеглої ділянки масиву обернено пропорційно зменшується від значень відносної довжини ділянки зчеплення та прагне до

одиниці при якісно встановленому анкері. Показана можливість оцінки ступеню на-тягу анкерного кріплення. Запропоновано критерії оцінки стану системи «анкер – масив гірських порід» за результатами ударно-хвильового контролю.

5. Вдосконалений метод ударно-хвильового контролю передбачає попередню затримку аналізу сигналу для закінчення перехідних процесів в системі «анкер – породний масив», амплітудну та частотну його селекцію та визначення часу релаксації вільних коливань в якості інформативного параметра. Для реалізації методу створено декілька варіантів апаратури, з яких найкращих є модифікація КВАК-4, виконана на мікропроцесорній основі, що передбачає програмування режиму роботи та автоматизовану статистичну обробку первинних даних в реальному часі. Розроблено програмне забезпечення, принципова схема та макетний зразок апаратури ударно-хвильового контролю геомеханічного стану системи «анкер – масив гірських порід», який успішно пройшов випробування на стендах та в промислових умовах шахт, рудників і інших підземних об'єктів.

6. Методика і апаратура були апробовані, а в подальшому використані при вирішенні конкретних гірничо-технологічних задач, які стосуються технічної діагностики стану гірничих виробок та інших підземних об'єктів з анкерним кріпленням, зокрема, гіпсової шахти ТДВ «Сініат» (м. Бахмут) та вугільної шахти «Тернівська» ДТЕК «Павлоградвугілля» (м. Тернівка), штолень і похилих стовбурів Новокриворізького гірничозбагачувального комбінату компанії «Арселорміттал» (м. Кривий Ріг). Розробка включена обов'язковою складовою частиною систематичного контролю стійкості виробок гіпсової шахти і продовжує використовуватися в процесі щоквартального моніторингу їх геомеханічного стану. Розроблено і затверджено компанією «ДТЕК ЕНЕРГО» «Методичне керівництво з керування контролем анкерного кріплення гірничих виробок шахт і рудників».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сергієнко В. М., Красовський І. С. Об автоматизированной адаптивной статистической обработке результатов измерений. *Геотехнічна механіка, міжвідомчий збірник наукових праць*. 2015. №124. С. 148-158.
2. Амелін В. А., Амеліна Л. В., Красовський І. С., Войтович Т. Г. Определение технологических параметров комбайновой отбойки гипса в условиях Анастасово-Порецкого месторождения. *Геотехнічна механіка, міжвідомчий збірник наукових праць*. 2015. №123. С. 126-158.
3. Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. Неразрушающий контроль качества установки анкерной крепи. *Геотехнічна механіка, міжвідомчий збірник наукових праць*. 2015. №125. С. 229-240.
4. Красовський І. С. Устройство для определения силы удара при динамических испытаниях конструкций. *Геотехнічна механіка, міжвідомчий збірник наукових праць*. 2016. №129. С. 198-205.
5. Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. Обоснование параметров контроля качества закрепления анкеров в породном массиве виброакустическим ме-

тодом. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2017. № 1(304). С. 106-110.

6. Skipochka S. I., Krukovskiy O., Serhiienko V. N., Krasovskiy I. S. Non-destructive testing of rock bolt fastening as an element of monitoring the state of mine workings. *Mining of Mineral Deposits – Dnipro University of Technology*. 2019. №13 (1). P. 16-23.

7. Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. До обґрунтування ударно-хвильового методу контролю анкерного кріплення. *Науково-виробничий журнал Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва Кременчуцький нац. ун-т ім. М. Остроградського*, Кременчук. 2018. С. 47-55.

8. Патент України на кор. модель №105379, E21D 11/10. Спосіб зведення литої смуги / Скіпочка, С. І., Селезньов, А. М., Яланський, А. А., Слащова, О. А., Красовський, І. С. – заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. № u2015 11342, заявл. 17.11.2015; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5. 3 с

9. Патент України на кор. модель №106114 МПК(2016.01), E21D 21/00, E21D 11/00, H01F 7/00. Анкер / Скіпочка, С. І., Селезньов, А. М., Яланський, А. А., Слащова, О. А., Красовський, І. С. – заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. № u2015 11843, заявл. 30.11.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7. 3 с

10. Патент України на кор. модель №117494, МПК(2017.01), E21D 21/00. Стенд для випробування анкерів / Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. – заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. № u2017 00845, заявл. 30.01.2017; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 4 с.

11. Патент України на кор. модель №117528, МПК(2017.01), E21D 20/00. Спосіб стендового випробування металополімерного анкера / Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Селезньов А. М., Амелін В. А., Красовський І. С. – заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. № u2017 01010, заявл. 03.02.2017; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 4 с.

12. Патент України на кор. модель №122418, МПК(2017.01), E21D 20/00. Спосіб контролю якості закріплення анкерного стрижня в свердловині / Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. – заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ. № u2017 06326, заявл. 21.06.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1. 6 с.

13. Красовський І. С. Узел обработки данных для портативной измерительной аппаратуры. *Матеріали конференції «Інноваційний розвиток гірничодо-бувної галузі»*. Кривий Ріг: ДВНЗ “Криворізький національний університет”. 2017. С. 141.

14. Скіпочка С. І., Сергієнко В. М., Красовський І. С. Неруйнівний контроль анкерного кріплення гірничих виробок. *XII Міжнародна науково-практична конференція “Школа підземної розробки”*, Бердянськ. 2018. С. 25-27.

15. Skipochka S. I., Krukovskiy O., Serhiienko V. N., Krasovskiy I. S. Physical modeling of the rock bolt interaction with the rock massif. *E3S Web Conf., Ukrainian School of Mining Engineering*. 2019. №123.

Особистий внесок здобувача у роботах, написаних у співавторстві: в роботах [1, 3, 5 - 7] – брав участь в обґрунтуванні використання ударно-хвильового методу неруйнівного контролю з використанням мікропроцесорної техніки, розробці програмного забезпечення для реалізації алгоритмів обробки даних, розробці апаратури неруйнівного контролю, [2] – виконав теоретичні дослідження і обробку результа-

тів, [8 – 12] - брав участь в математичному моделюванні, [14, 15] – брав участь у постановці теоретичних задач, розробці стендів для моделювання поведінки анкера та експериментальних дослідженнях.

АНОТАЦІЯ

Красовський І. С. “Вдосконалення методу і розробка засобів неруйнівного контролю геомеханічного стану системи “анкер – масив гірських порід” – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». - Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена розвитку існуючих уявлень про особливості ударно-хвильових процесів в системі «анкер – масив гірських порід», теоретико-експериментальному обґрунтуванні закономірностей, що пов’язують параметри загасаючого коливального процесу анкера з його довжиною та характеристиками натягу і міцності закріплення (зчеплення з середовищем). В роботі вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено використання часу релаксації затухаючих вільних коливань анкера в якості інформативного параметру для апаратури неруйнівного контролю. Крім того, експериментальні дослідження виявили, що довжина анкера, його натяг і зчеплення однозначно впливають на значення інформативного параметру. При цьому, залежність інформативного параметру від натягу і зчеплення анкера з масивом близька до обернено пропорційної.

Результатом роботи стала апаратура неруйнівного контролю ударно-хвильовим методом в якій вдалося реалізувати алгоритм первинної статистичної обробки даних, що, в свою чергу, підвищило точність і інформативність визначення інформативного параметра безпосередньо на місці виконання досліджень.

Основні результати роботи реалізовані у вигляді складової частини “Методичного керівництва з неруйнівного контролю анкерного кріплення гірничих виробок шахт і рудників”, затверджене “ДТЕК ЕНЕРГО”.

Ключові слова: гірські породи, анкер, неруйнівний контроль, експрес-контроль, ударно-хвильовий метод, апаратура.

АННОТАЦИЯ

Красовский И. С. "Совершенствование метода и разработка средства неразрушающего контроля геомеханического состояния системы "анкер - массив горных пород"- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 - «Геотехническая и горная механика». - Институт геотехнической механики им. М. С. Полякова Национальной академии наук Украины, Днепр, 2020.

Диссертация посвящена развитию существующих представлений об особенностях ударно-волновых процессов в системе «анкер - массив горных пород», теоретико-экспериментальном обосновании закономерностей, что связывают параметры затухающего колебательного процесса анкера с его длиной и характеристиками натяжения и прочности закрепления (сцепление со средой). В работе впервые теоре-

тически обосновано и экспериментально подтверждено использование времени релаксации затухающих свободных колебаний анкера в качестве информативного параметра для аппаратуры неразрушающего контроля. Кроме того, экспериментальные исследования показали, что длина анкера, его натяжение и сцепление с массивом однозначно влияют на значение информативного параметра. Причем, зависимость информативного параметра от натяжения и сцепления анкера близка к обратно пропорциональной.

Результатом работы стала аппаратура неразрушающего контроля ударно-волновым методом, в которой удалось реализовать алгоритм первичной статистической обработки данных, что, в свою очередь, повысило точность и информативность измерений прямо на месте выполнения исследований.

Основные результаты работы реализованы в виде составной части "Методического руководства по неразрушающему контролю анкерного крепления горных выработок шахт и рудников", утвержденное "ДТЭК Энерго".

Ключевые слова: горные породы, анкер, неразрушающий контроль, экспресс-контроль, ударно-волновой метод, аппаратура.

SUMMARY

Krasovskiy I.S. "Method improvement and equipment development for non-destructive control of geomechanical state of the "anchor - rock mass" system" - Manuscript.

Thesis for a Candidate of Science Degree, specialty 05.15.09 - "Geotechnical and Mining Mechanics". - M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics. of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2020

The dissertation is devoted to the development of existing ideas about the properties of shockwave processes in the "anchor - rock mass" system, theoretical and experimental substantiation of the laws linking the parameters of the damping oscillating process of the anchor with its length, tension and mounting quality (adhesion). For the first time, the use of the relaxation time of the damped free oscillations of the anchor as an informative parameter for the non-destructive testing equipment is theoretically substantiated and experimentally confirmed. In addition, experimental studies have found that the length of the anchor, its tension and adhesion strength clearly affect the value of the informative parameter. Moreover, the dependence of the informative parameter on the tension and adhesion of the anchor to the array is close to inversely proportional.

The result of the work was the equipment of non-destructive testing by shock-wave method in which it was possible to implement the algorithm of primary statistical data processing, which, in turn, increased the accuracy and informativeness of determining the informative parameter directly at the research site.

The main results of the work are realized in the form of a component of the "Methodical manual on non-destructive testing of anchoring of mine workings and mines", approved by DTEK ENERGO.

Keywords: rocks, anchor, non-destructive testing, express control, shock-wave method, equipment.

Красовський Ігор Св'ятославович

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБКА ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО
КОНТРОЛЮ ГЕОМЕХАНІЧНОГО СТАНУ СИСТЕМИ
«АНКЕР – МАСИВ ГІРСЬКИХ ПОРІД»

(Автореферат)

Реферат

Підписано до друку 04.11.20. Формат 60×90/16
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Папір офсетний. 1,0 умов. друк. арк.
Тираж 100 прим. Зам. №
Друк ТОВ «Барвікс»

Свідоцтво про внесення до державного реєстру
№24 від 25.07.2000 р.

49005, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 17