

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підземна розробка твердих корисних копалин включає процеси руйнування гірських порід під час різних технологічних операцій і керування їхнім станом. Руйнування міцних гірських порід відбувається буровибуховим способом (БВР). При цьому частка міцних порід, що вміщують вугільні пласти в Донбасі, становить 25 – 30%.

Застосування БВР обмежене у виробках, що вміщують викидонебезпечні і загрозові пласти вугілля й піщаників. Крім того потрібне дотримання особливого режиму безпеки у виробках з вихідним струменем повітря, наявністю дегазаційних трубопроводів, високою запиленістю, а також з концентрацією техніки й устаткування. Тому руйнування негабаритних блоків і присічка міцних порід при відновленні експлуатаційного перетину виробок ускладнені або неможливі.

Одним з найбільш перспективних статичних способів є руйнування невибуховими руйнуючими сумішами (НРС). Однак застосування НРС можливе тільки після вивчення особливостей їх гідратаційного твердіння й розширення в температурних і силових полях, властивих породам, що вміщують підземні гірничі виробки. Ці питання вивчені недостатньо й вимагають проведення досліджень для встановлення закономірностей формування напружено-деформованого стану масиву гірських порід за рахунок розширення НРС у шпурових й свердловинних зарядах. Слід розглянути процеси кінетики гідратації НРС, динаміку підвищення напружень, конструкції заряду, фізико-механічні властивості породного масиву для консолідації й руйнування гірських порід.

Синтез цілої низки фізичних процесів і технологічного удосконалення параметрів стійкості гірничих виробок на різних етапах їх підтримання й при відновленні експлуатаційного стану є актуальною новою науково-технічною проблемою, що має суттєве значення для безпечного ведення гірничих робіт у складних гірничо-геологічних умовах розробки родовищ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р. № 942 «Технології виявлення й оцінки корисних копалин, їх раціонального й безпечного видобутку», стратегією розвитку паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року «Вугільна промисловість», а також із пріоритетним тематичним напрямком наукових досліджень ДВНЗ ДонНТУ відповідно до наказу МОНМС України від 07.07.2011 р. № 535 «Високоєфективне встаткування й ресурсозберігаючі технології в гірничій, геологорозвідувальній і нафтовій галузях промисловості», що входять до держбюджетних тем ДВНЗ ДонНТУ: «Розробка та впровадження нетрадиційних ресурсозберігаючих технологій управління напружено-деформованим станом гірського масиву навколо виробок» (державний реєстраційний номер 0110U001053); «Розвиток теоретичних основ управління геомеханічним станом дискретного породного масиву для

забезпечення стійкості підготовчих виробок глибоких шахт» (д.р. № 0111U002118); Н 5-11 «Дослідження напружено-деформованого стану і міцносних властивостей гірського масиву в умовах ВП «Шахта Стаханова» і розробка заходів для підтримання виробок позаду лави»; Н 11-13 «Удосконалення способів підвищення стійкості гірничих виробок в умовах глибоких шахт» (д.р. № 0113U001787). В рамках держбюджетної теми УкрНДМІ НАН України «Геомеханічні, гідрогеологічні і геологічні процеси у гірських масивах при консервації гірничодобувних підприємств» (д.р. № 0110U007406); госпрозрахункової теми ТОВ «Технопарк ДонДТУ «УНІТЕХ» з ПАТ Ш/У«Покровське» №320/10 «Розробка способу невибухового руйнування негабаритних блоків гірських порід в очисному вибої».

Ідея роботи полягає у використанні закономірностей формування перехідних процесів у НРС й ефекту їх статичного впливу в часі на гірський масив для управління напружено-деформованим станом гірських порід і кріпильними системами гірничих виробок.

Наукова проблема полягає у встановленні закономірностей формування напружено-деформованого стану (НДС) при застосуванні невибухових руйнуючих сумішей з урахуванням кінетики їх гідратації в шпурових і свердловинних зарядах у часі, конструкції зарядів, впливу технологічних фізичних процесів для управління станом гірських порід при відновленні експлуатаційного перетину гірничих виробок та забезпеченні їх стійкості на різних етапах підтримання.

Метою роботи є створення наукових основ управління станом гірських порід невибуховими руйнуючими сумішами з урахуванням закономірностей формування перехідних процесів у цих сумішах та ефекту статичного впливу в часі на гірський масив і кріпильні системи гірничих виробок при підземній розробці родовищ.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені наступні завдання досліджень:

1. Розробка методики визначення фазового стану сумішей НРС у процесі гідратації в умовах шпурових і свердловинних зарядів.

2. Встановлення впливу фазового стану води в розчині НРС, коефіцієнта розширення суміші, температури, попереднього стиснення й електричного поля на динаміку зростання і величину тиску розширення за допомогою фізичних методів дослідження.

3. Визначення етапу розвитку тріщин в гірських породах і параметри їх спрямованого руйнування під впливом НРС методами математичного моделювання та проведенням лабораторних випробувань.

4. Розробка моделі руйнування гірських порід НРС з урахуванням існуючого поля напружень і спрямованого руйнування на підставі силового критерію Грифітса-Ірвіна.

5. Розробка та апробування способів і засобів керованого та безпечного руйнування гірських порід за допомогою НРС при руйнуванні негабаритів, проведенні та відновленні експлуатаційного стану виробок.

6. Встановлення впливу жорсткості охоронної споруди та довжини консолі основної покрівлі на локалізацію в ній критичних напружень методами математичного та еквівалентного моделювання.

7. Розробка принципів управління НДС гірських порід при підтриманні підготовчої виробки за лавою й обґрунтування параметрів способів їх охорони при примусовому обваленні консолі основної покрівлі НРС.

Об'єкт дослідження – процеси управління станом гірських порід під дією полів напружень, викликаних розширенням НРС при відновленні експлуатаційного перетину гірничих виробок і обваленні порід у лавах.

Предмет дослідження – закономірності формування перехідних процесів в НРС і ефект їх статичного впливу в часі на гірський масив і кріпильні системи гірничих виробок при управлінні гірським тиском в очисних вибоях.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає: аналіз і узагальнення раніше виконаних досліджень; методи ЯМР спектроскопії, механіки руйнування, кінцевих елементів; експериментальні дослідження фізико-механічних властивостей НРС в об'ємному нерівнокомпонентному напруженому стані на установці нерівнокомпонентного тривісного стиску (УНТС), випробування НРС в різних деформаційних режимах на розробленому стенді, лабораторні дослідження на структурних моделях і моделях з еквівалентних матеріалів; шахтні інструментальні спостереження за процесом деформування і зрушення гірських порід; комп'ютерна обробка, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, дослідно-промислова перевірка і випробування розроблених способів і засобів руйнування гірських порід і управління їх НДС.

Наукові положення, що винесені на захист:

1. При розширенні НРС тиск у гірських породах змінюється за логарифмічною залежністю від жорсткості системи «НРС-масив», температури і впливу електричного поля. Управління кінетикою гідратації НРС, що здійснюється шляхом його попереднього стиснення 0,26–17,5 МПа, збільшує за квадратичною залежністю тиск у 1,05 – 1,37 разів. Дія електричного поля на НРС викликає зростання швидкості реакції гідратації по експоненті від величини електричної напруги до 300 разів. Це дозволяє підвищити ефективність руйнування гірських порід при відновленні експлуатаційного стану гірничих виробок.

2. При розміщенні двоелементного патрона НРС з зазором (a) між силовими елементами 4 – 27% від діаметра шпуру (d) на стінках останнього створюються концентратори розтягуючих напружень, коефіцієнт яких описується зворотною статечною залежністю відносини a/d ($k = 1,9 – 4$), що дозволяє керувати швидкістю і напрямком руйнування гірських порід при проведенні гірничих виробок і забезпеченні їх стійкості.

3. Критичні напруження $[\sigma_{1max}]$ в основній покрівлі зростають за поліноміальною залежністю другого порядку при збільшенні довжини породної консолі у виробленому просторі. Локалізація $[\sigma_{1max}]$ визначається співвідношенням жорсткостей охоронної споруди c_n та пласта c_y , так, при

$c_n/c_y > 1$, $[\sigma_{1max}]$ формуються над охоронною спорудою, викликаючи руйнування покрівлі в стані узагальненого зсуву, при $c_n/c_y < 1$, місце $[\sigma_{1max}]$ та руйнування основної покрівлі – з боку пласта. Це дозволяє визначати пріоритетні напрямки управління НДС масиву з урахуванням якісних змін механізму навантаження охоронної системи.

4. При вміщенні НРС у покрівлю над охоронною спорудою відбувається зміна градієнту і екстремуму $[\sigma_{1max}]$ в основній покрівлі над виробкою, що підтримується за лавою, і збільшення $[\sigma_{1max}]$ за лінійною залежністю від тиску розширення P , що викликає первинне руйнування покрівлі в присвердловинній області при P у 1,14 разів більше міцності порід на одновісне розтягнення $[\sigma_p]$ незалежно від c_n/c_y , а при $P = 4,3[\sigma_p]$ $[\sigma_{1max}]$ над охоронною спорудою перевищують $[\sigma_p]$ у 3 рази і у 1,6-1,8 рази вище, ніж з боку пласта, що дозволяє керувати часом та місцем обвалення основної покрівлі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше встановлено, що максимальне розширення НРС відбувається на третій стадії гідратаційного твердіння при зміні фазового стану води в розчині;

- отримані нові закономірності зміни кінетики розширення НРС від жорсткості системи «НРС-масив», температури навколишнього середовища, попереднього стиснення, впливу електричного поля, введення етанової кислоти і гумату натрію, що дозволяє регулювати швидкість гідратації і тиск розширення НРС при вирішенні завдань руйнування гірських порід і управління їх НДС;

- вперше встановлено, що динаміка росту і абсолютна величина тиску розширення НРС в різних просторових напрямках, модуль деформації НРС залежать від деформаційного режиму системи, а при вміщенні НРС у замкнуту порожнину тиск розширення в будь-якому просторовому напрямку визначається опором стінок порожнини у відповідному напрямку;

- вперше виявлено, що значення модуля деформації НРС при розширенні суміші близькому до нуля визначається за залежністю $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, де σ_{cp} – значення середніх напружень, а при вміщенні НРС у порожнину з податливими стінками, при розширенні суміші до 13,6%, модуль деформації може бути розрахований за залежністю $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$;

- уточнено закономірність зміни головних напружень σ_1 навколо шпуру з НРС у процесі росту структурних новоутворень. При вміщенні суміші в шпури у патронах з силовими елементами у вигляді половин труби, отриманих поздовжнім діаметральним розрізом на стінках шпуру в одному з його напрямків, що збігається з орієнтацією зазорів, виникають зони підвищених напружень σ_1 , що дозволяє управляти напрямком руйнування порід;

- розроблено модель руйнування гірських порід НРС з урахуванням існуючого поля напружень, що дозволяє розраховувати параметри руйнування гірських порід на підставі локального силового критерію Грифітса-Ірвіна;
- розроблено принципи управління НДС масиву гірських порід штучною зміною компонент напружень навколо гірничої виробки за рахунок примусового стиснення масиву при розширенні НРС, вміщених у шпури;
- визначено зону впливу шпуру з НРС у суцільному і дискретному середовищі, що дозволяє визначити параметри способів кріплення виробок, розроблених на основі зазначених рішень;
- розроблено аналітико-експериментальний метод розрахунку динаміки зростання тиску розширення НРС у часі, залежно від допустимих об'ємних деформацій, температури і попереднього стиснення;
- встановлено залежність підвищення несучої здатності зруйнованих гірських порід, представлених блочно-дискретним середовищем від їх розпору НРС вміщеними в шпури, що дозволяє визначати необхідні для забезпечення стійкості виробок відстань між шпурами з НРС і довжину шпурів;
- розвинене уявлення про механізм руйнування породного масиву навколо виробки, підтримуваної за лавою, і встановлено, що стійкість підготовчої виробки, що підтримується за очисним вибоєм, значною мірою визначається довжиною консолі основної покрівлі, що залежить у виробленому просторі, та режимом роботи охоронної споруди, які надають основний вплив на місце руйнування порід покрівлі;
- доведено, що мінімізація енерговитрат на примусове обвалення консолі основної покрівлі за допомогою НРС, поміщених у свердловини, досягається за рахунок зміни НДС та створення умов для руйнування порід в зоні природних розтягуючих напружень вище нейтральної вісі шару, що залежить.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується використанням фундаментальних положень фізики та механіки руйнування твердого тіла, положень гірничої геомеханіки; результатами натурних спостережень за деформаційними процесами у породному масиві навколо виробок, що підтримуються в різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умовах; використанням апробованих методик фізичного моделювання; лабораторними дослідженнями більш ніж на ста моделях; застосуванням методу математичного моделювання МСЕ, збіжністю результатів математичних, лабораторних та натурних досліджень (розбіжність не перевищує 22%); позитивними результатами випробувань способів і засобів руйнування гірських порід й управління їх НДС у шахтних умовах.

Наукове значення роботи полягає у встановленні закономірностей формування перехідних процесів у невибухових руйнуючих сумішах і їх статичного впливу в часі на гірський масив і кріпильні системи гірничих виробок, що дозволило створити наукові основи управління станом гірничих порід при підземній розробці родовищ.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблено методику визначення параметрів руйнування гірських порід у підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей.

2. Розроблені та затверджені МакНДІ «Рекомендації по застосуванню невибухових руйнуючих складів в умовах підземних гірничих виробок вугільних шахт Донбасу».

3. Розроблено методику визначення параметрів способу боротьби зі здиманням підшви гірничих виробок з мінімальними енерговитратами на руйнування порід підшви за рахунок спрямованого локального квазістатичного впливу.

4. Розроблені та захищені патентами України спосіб кріплення гірничих виробок, які проведені у породах, схильних до здимання, і спосіб підвищення стійкості підовши гірничої виробки.

5. Розроблено методику визначення параметрів способу зміцнення гірських порід в процесі підтримання виробки, заснованого на ефекті стиснення зруйнованих порід за допомогою НРС.

6. Розроблено методику визначення параметрів способу кріплення гірничих виробок, заснованого на зміні співвідношення компонентів напружень поблизу гірничої виробки за допомогою НРС, вміщених в шпури.

7. Розроблено методику визначення параметрів способу охорони підготовчих виробок, заснованого на зміні НДС масиву шляхом запобігання зависанню основної покрівлі на межі з виробленим простором, а також управлінні часом і місцем її руйнування.

8. Розроблено, запатентовано й випробувано модифіковані НРС з додаванням етанової кислоти і гумату натрію.

9. Розроблено способи невибухового руйнування гірських порід, засновані на управлінні кінетикою розширення НРС за допомогою попереднього стиснення в зарядній камері, регулювання теплообмінних процесів між зарядом НРС і гірськими породами, впливу на НРС електричного поля.

10. Обґрунтовано метод розрахунку параметрів способу спрямованого руйнування гірських порід за допомогою НРС, заснованого на створенні на стінках шпуру в заданому напрямку концентраторів розтягуючих напружень. Запропоновані конструкції патронів НРС для реалізації способу, які захищені патентами України .

11. Розроблено спосіб проведення гірничих виробок, захищений патентом України, в якому за рахунок квазістатичного впливу на гірські породи досягається їх руйнування зі збереженням природної міцності і несучої здатності порід приконтурної зони та обґрунтовано методику визначення параметрів способу.

12. Розроблено й апробовано спосіб ремонту гірничих виробок, в якому за рахунок спрямованого квазістатичного впливу на породи, зміщені в порожнину виробки, досягається їх руйнування і плавне опускання з

урахуванням площин ослаблення по кліважним тріщинам, при відсутності знеміцнення приконтурних порід.

Усі наведені вище технологічні рішення в методиках захищені патентом України як способи.

Реалізація результатів роботи.

Результати дослідження впроваджено на Хлібодарівському кар'єроуправлінні, ВП «Шахта«Добропільська», ПАТ Ш/У«Покровське». Розроблено та затверджено стандарт підприємства СТП (02070826) (33161769): 2014 «Методика визначення параметрів руйнування гірських порід у підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей». Запропонований у роботі спосіб руйнування за допомогою НРС є одним з варіантів впливу на привибійну частину масиву в СОУ-П 10.1.00174088.031: 2011 «Контроль за проведенням способів і технологічних процесів за параметрами акустичного сигналу під час розкриття схильних до ГДЯ вугільних пластів». Сумарний річний ефект від впровадження рекомендацій склав 1,46 млн грн.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовано мету і завдання дослідження, ідея роботи, її основні наукові положення, висновки і рекомендації, програма лабораторних та шахтних експериментів, розроблені методики та проаналізовано результати досліджень, обрано методи і проведені математичні дослідження. Автор брав безпосередню участь в організації та проведенні лабораторних і шахтних експериментів, апробації результатів роботи. Як керівник, відповідальний виконавець і виконавець автор брав безпосередню участь у виконанні НДР, в розробці нормативних документів. Зміст дисертації викладено автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи в цілому і окремі її етапи обговорювалися і отримали схвалення на Міжнародних конференціях: X, XI Skola Geomechaniki (m. Gliwice-Ustron, Poland, 2011, 2013), «Тиждень гірника» (м. Москва, Росія, 2008), «Удосконалення технології будівництва шахт і підземних споруд» (м. Донецьк, Україна, 2008, 2010 – 2013), Miedzynarodowe Sympozjum Geotechnika – Geotechnics (m. Gliwice-Ustron, Poland, 2010, 2012), «Нові технології підземного будівництва і видобутку корисних копалин» (м. Алчевськ, Україна, 2008); «Перспективи освоєння підземного простору» (м. Дніпропетровськ, Україна, 2008, 2011), «Досвід минулого-погляд у майбутнє» (м. Тула, Росія, 2011), «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (м. Кривий Ріг, Україна, 2011, 2013), «Школа підземної розробки» (м. Ялта, Україна, 2012), «Перспективи розвитку східного Донбасу» (м. Шахти, Росія, 2013), «Ресурсовідновлювальні, маловідходні та природоохоронні технології освоєння надр» (м. Занджан, Іран, 2013)), Міжнародному форумі-конкурсі молодих вчених «Проблеми надрокористування» (м. Санкт-Петербург Росія, 2011, 2012), на всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Донбас-2020: Перспективи розвитку очима молодих вчених» (м. Донецьк, 2012), «Інноваційні технології розробки родовищ корисних копалин» (м. Донецьк, 2013), регіональній конференції: «Проблеми гірничої технології» (м. Красноармійськ, 2010, 2012).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 83 наукових публікаціях, з них 42 – у наукових фахових виданнях України, в тому числі 11 без співавторів, 18 – матеріали конференцій та симпозіумів, 20 – патенти на винахід, 2 – патенти на корисну модель, 1 – СОУ.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 370 найменувань на 38 сторінках; містить 325 сторінок основного тексту, 137 рисунків, 6 таблиць, додатки на 94 сторінках; загальний обсяг дисертації складає 457 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано наукову проблему, мету, ідею та завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукові положення, що виносяться на захист, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію результатів та структуру роботи.

У першому розділі роботи здійснено аналіз досліджень, присвячених управлінню напружено-деформованим станом гірських порід статичним прикладанням зовнішніх навантажень.

Питання безпечного та керованого руйнування гірських порід при видобуванні корисних копалин та забезпеченні стійкості гірничих виробок знаходяться в центрі уваги вчених держав, що мають розвинену видобувну промисловість. Одним із сучасних перспективних напрямків безпечного та керованого руйнування порід є використання НРС, хімічна реакція гідратації яких супроводжується виникненням механічних напружень без горіння і детонації у середовищі, що містить суміш. Перевагами НРС є відсутність динамічного впливу на масив, виділення шкідливих газів, звукових та інших коливань. Для реалізації способу не потрібне придбання спеціального обладнання чи пристроїв. Руйнування може бути реалізовано у виробках із вихідним струменем повітря і високої запиленістю, небезпекою газодинамічних явищ, наявністю транспортного та електричного обладнання, трубопроводів і комунікацій, при цьому виключається можливість їх ушкодження. Значна роль у розробці та удосконаленні способів невибухового руйнування належить ученим: Японії (компанії Onoda cement Co Ltd, Sumitomo Cement Co Ltd, Nippon Cement Co, Denki Kagaku Kogyo Kk.), Англії (Fosroc International Limited), Чехії, Швеції, США, Німеччини, Іспанії, Росії (ВНІСТРОМ ім. П.П. Будникова, НДЦцемент, Російський хіміко-технологічний університет, науково-дослідний інститут бетону і залізобетону, Північно-кавказський гірничо-металургійний інститут) та України (Львівський політехнічний інститут, Київський політехнічний інститут, Харківський дослідний цементний завод, ІГТМ НАН України) та ін.

Найбільшу ефективність мають суміші на основі оксиду кальцію. Спроби використання в НРС матеріалів з використаннями оксиду магнію, реакції утворення брусита або еттрінгіта не набули поширення. Незважаючи на велику

кількість різних НРС, досвід їх застосування досить обмежений. Тому пошук концептуальних рішень, спрямованих на розширення сфери застосування НРС, зокрема використання їх в умовах підземних гірничих виробок, розробка нових сумішей і дослідження режимів їх роботи є важливими і актуальними завданнями сучасного гірничого виробництва.

Аналіз світового досвіду експлуатації підземних родовищ корисних копалин свідчить про стійку тенденцію погіршення гірничо-геологічних умов розробки. Це призводить до того, що існуючі способи підтримання та охорони гірничих виробок не забезпечують їх безремонтний стан під час експлуатації. Результати оцінки підготовчих гірничих виробок шахт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України зазначають, що 19-23% з них знаходяться в незадовільному стані.

Вагомий внесок у розвиток науки управління напружено-деформованим станом гірського масиву й у вирішенні проблеми підтримання гірничих виробок внесли вчені інститутів: ВНДМІ, ДонНТУ, ДонВУГІ, ІГС ім. Скопинського, ІГТМ НАНУ, ІФГП НАНУ, НГУ, УкрНДМІ НАНУ та ін. Однак, незважаючи на те, що питання дослідження НДС масиву навколо виробок вивчені досить глибоко, у науково-технічній літературі практично відсутні як результати досліджень ступеня впливу різних природних і технологічних факторів на стійкість підтримуваних виробок у часі, так і спроби виокремити найбільш істотні фактори, що підлягають регулюванню. Внаслідок цього традиційні конструкції кріплення і способи охорони реалізуються, як правило, на стадії спорудження виробок, що не дозволяє враховувати зміни напружено-деформованого стану масиву, що вміщує виробку, з плином часу. Застосування низки способів управління НДС порід обмежується високою метановістю шахт і небезпекою ГДЯ.

Аналіз наукового фонду дозволив виокремити п'ять основних етапів підтримання виробки, виокремити домінуючі фактори, що зумовлюють стійкість на кожному етапі й передбачити шляхи забезпечення стійкості виробок, що засновані на особливостях кожного етапу. Це створює передумови для розробки нових наукових концептуальних рішень і шляхів управління напружено-деформованим станом порід для забезпечення стійкості гірничих виробок за допомогою НРС.

На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання досліджень.

У другому розділі зазначені методологія досліджень, прилади, обладнання й інструменти, методики експериментальних робіт і математичних досліджень.

Дослідження кінетики гідратації й фазового стану НРС проводилися за допомогою методу ЯМР спектроскопії в двох деформаційних режимах системи: в умовах жорсткої оболонки (у скляних пробірках) та в оболонці схильної до пластичних деформацій (у пробірках із фторопласту). Початковий період гідратації відстежували шляхом безперервного запису спектрів ЯМР.

Дослідження фізико-механічних властивостей НРС включали експерименти на установці нерівнокомпонентного тривісного стиску (УНТС) і у спеціально розробленому стенді. Випробування на УНТС проводили за

трьома програмами: в умовах обмеження деформацій за усіма вісями; вільних деформацій за усіма вісями; обмеження деформацій по горизонтальним вісям і вільного переміщення по вертикалі.

Випробування на стенді проводили у трьох деформаційних режимах, які характеризували роботу НРС: 1 – у вільному стані, без обмеження об'ємних переміщень; 2 – у заданому діапазоні збільшення об'єму; 3 – в умовах попереднього стиснення. Дослідження термокінетичних характеристик НРС проводилися за допомогою електронних термометрів в оболонках з різною жорсткістю і температуропровідністю. Дотримувався критерій подібності теплопровідності. За стандартними методиками визначали терміни схоплювання на приладі Віка і рухливість сумішей за розплавом конусу. Дослідження впливу електричного поля на швидкість гідратації НРС проводилися за допомогою розробленої експериментальної установки на базі лабораторного автотрансформатора ЛАТР 2,5.

Робота містить результати чисельного математичного моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Рішення задач МСЕ проводили в нелінійній постановці з урахуванням геометричної нелінійності і міжшарових контактів, в умовах нестационарного аналізу з неявним завданням часу. В результаті імітаційного моделювання були розроблені деформаційні моделі на основі базової моделі Друкера-Прагера, що враховують анізотропію модуля пружності, модуля зсуву і коефіцієнту поперечної деформації, а також ділатансії. Для отримання вихідних даних для деформаційних моделей, що розроблені, та їх калібрування було проведено кілька фізичних експериментів на УНТС. Під час моделювання блочно-структурованого масиву блоки порід приймалися з пружними властивостями, на контактах блоків задавався коефіцієнт зовнішнього тертя.

Дослідження методом еквівалентних матеріалів проводили з використанням геометричного критерію подібності та подібності механічних характеристик. Масштаб моделювання 1:50. Моделювання здійснювали з використанням піщано-парафінових сумішей за стандартною методикою. На структурних моделях досліджували підвищення несучої здатності зруйнованих порід, дискретної і блочно-дискретної структури при їх розпорі, а також особливості передачі тиску від розширення НРС через дискретне середовище.

Шахтні дослідження включали: інструментальні спостереження за зсувами порід на замірних станціях, вимірювання навантаження на кріплення і охоронну смугу на ділянках сполучення з очисним вибоєм за допомогою динамометрів, візуальні спостереження за станом виробок і метод фотофіксації. Інструментальні спостереження проводилися за двома методиками. Частина спостережень за рекомендаціями ВНДМІ, а частина за авторською методикою, що дозволяє визначати просторове переміщення замірних точок на контурі виробки навіть в умовах обмеженого вільного простору.

Обрані і розроблені методики експериментальних робіт, прилади та інструменти дозволяють вирішувати поставлені завдання дослідження.

У третьому розділі зазначені результати досліджень кінетики гідратації і фізико-механічних властивостей НРС, концептуальні напрями підвищення ефективності їх роботи в умовах підземних гірничих виробок.

У розчині НРС відразу після його приготування водень перебуває у вільному стані в молекулах води. Методом ЯМР спектроскопії, через зменшення кількості ядер, що резонують, встановлено, що в ході реакції гідратації водень переходить в хімічно зв'язаний стан в гідроксиді кальцію. Швидкість реакції може визначатися за інтенсивністю зміни ширини і амплітуди лінії поглинання. Проведені експерименти дозволили встановити особливості процесу гідратації в різних деформаційних режимах, при введенні пластифікаторів, етанової кислоти і гумату натрію.

Різний кут нахилу кривих інтенсивності спектральної лінії в пробірках зі скла і фторопласту дозволяє стверджувати про різні швидкості протікання реакції. У жорсткій оболонці процес протікає більш інтенсивно, що також визначається при випробуваннях НРС на УНТС. Для вивчення динаміки тепловиділення паралельно з експериментами на ЯМР спектрометрі були проведені заміри зміни температури (рис. 1).

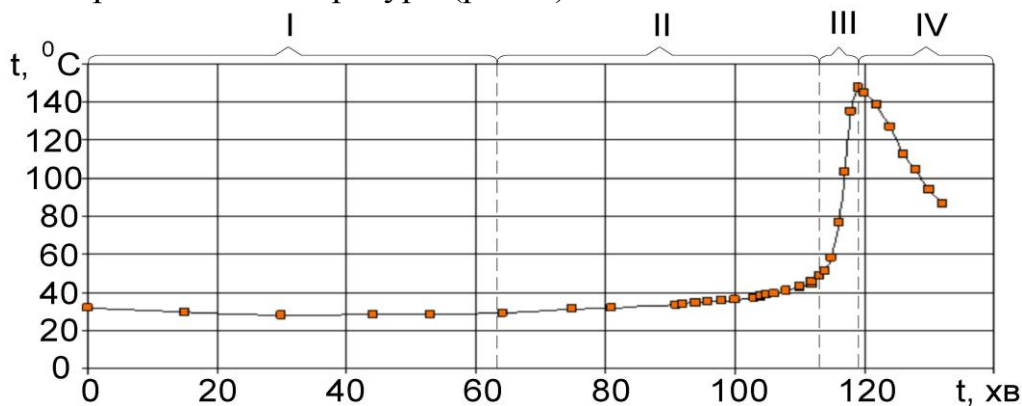


Рисунок 1 – Зміна температури НРС у часі і характерні стадії (I, II, III, IV) гідратації

Зіставлення динаміки зміни амплітуди спектральної лінії ЯМР і температури НРС зазначає, що індикатором гідратації може виступати температура суміші. Аналіз результатів проведених досліджень і теорій гідратації оксиду кальцію В.В. Осина і П.А. Ребіндера дозволив встановити чотири характерні стадії роботи НРС.

Перша стадія характеризується пастоподібною консистенцією розчину. При цьому вода знаходиться у вільному стані, температура суміші наближується до температури навколишнього середовища (рис. 1). Спостерігається підвищення рухливості суміші, коливання інтенсивності спектральної лінії ЯМР. Час протікання цього етапу визначається в основному температурою гірських порід і компонентів суміші, геометричними параметрами шпuru або свердловини і кількістю НРС. Друга стадія характеризується твердінням НРС, переходом води в хімічно зв'язаний стан, плавним зростанням температури з підвищенням швидкості (рис. 1) і, згідно В.В. Осину і П.А. Ребіндера, визначається протіканням перекристалізації

оксиду кальцію в гідроксид. Час протікання цієї стадії залежить переважно від вищезазначених факторів. Третя стадія характеризується різким стрибкоподібним зростанням температури до свого максимуму в часі (рис. 1), що є наслідком зростання новоутворень гідроксиду кальцію із максимальним тепловиділенням. Спостерігається стрибок інтенсивності спектральної лінії ЯМР і перехід розчину в тверду фазу, що фіксується на приладі Віка. НРС, що перебуває у вільному стані, на цій стадії досягає максимального розширення й перетворюється на порошок. У обмеженому обсязі цього періоду відповідає максимальний приріст тиску розширення. Час протікання цього періоду не залежить від зовнішніх факторів і визначається фракцією і хімічними домішками НРС. На четвертій стадії, коли основна частина суміші вже перекристалізована, відбувається зниження температури НРС (рис. 1), що супроводжується незначним зростанням об'єму, яке має спадаючий характер, час протікання цієї стадії визначається в основному температурою гірських порід.

У результаті експериментів на УНТС встановлено, що максимальний тиск розширення НРС досягається під час випробувань за першою програмою – при утриманні деформацій в нулі (рис. 2). При цьому динаміка розширення залежить від температурного режиму, жорсткості системи «масив-заряд НРС», діаметра шпуру або свердловини. Залежність тиску розширення НРС (P_{24}) від допустимих об'ємних деформацій (V_0) з коефіцієнтом апроксимації $R^2 = 0,98$ (рис. 3) має вигляд

$$P_{24} = -8,373 \ln(V_0) + 39,073, \text{ МПа}$$

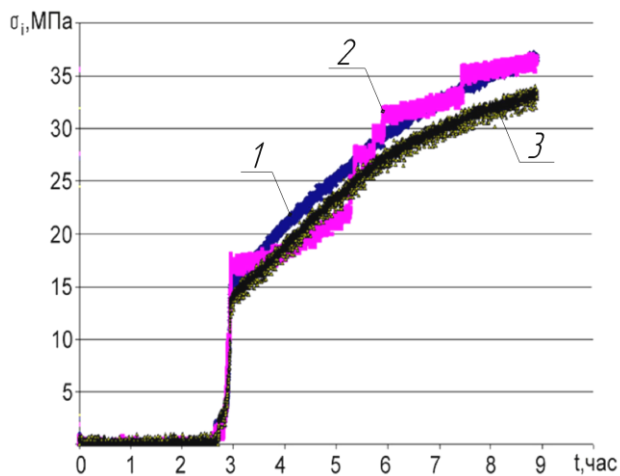


Рисунок 2 – Графіки залежності тиску розширення НРС від часу при нульових деформаціях системи: 1 – по осі OZ σ_{oz} ; 2 – по осі OY σ_{oy} ; 3 – по осі OX σ_{ox}

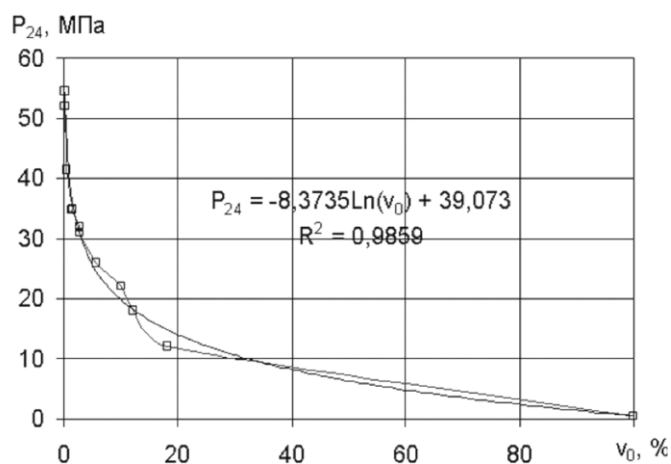


Рисунок 3 – Графіки залежності тиску розширення НРС від величини об'ємної деформації системи, через 24 години після приготування суміші (температура 24 °C)

Встановлено, що при вміщенні НРС у замкнену порожнину тиск його розширення і збільшення об'єму в будь-якому просторовому напрямку визначається опором стінок порожнини у відповідному напрямку. Зростання

тиску забезпечує не весь об'єм НРС у зразку, а його частина, що знаходиться в безпосередній біля межі з порожниною, в яку він вміщений. Визначено фізико-механічні властивості НРС при розширенні. За максимальний тиск, викликаний розширенням НРС, приймалися значення середніх напружень σ_{cp} системи. Модуль поперечної деформації при розширенні НРС, незалежно від програми навантаження, сягає 0,235-0,255.

Значення модуля деформації НРС при нульовому розширенні суміші може бути визначено за залежністю $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, а при розміщенні НРС у порожнину з податливими стінками та розширенні суміші до 13,6% – $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$.

Аналіз досліджень термокінетичних характеристик дозволив встановити, що підвищення температури гірських порід призводить до інтенсифікації швидкості гідратації і, відповідно, до збільшення об'єму НРС (рис. 4).

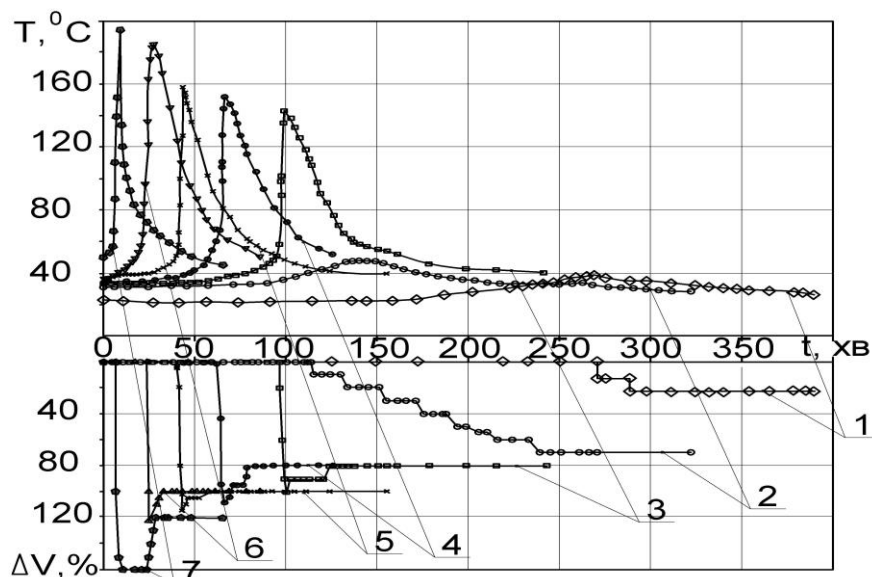


Рисунок 4 – Зміна температури ($t, ^\circ C$) і об'єму ($\Delta V, \%$) НРС у часі при температурі навколишнього середовища: 1 – 20 $^\circ C$; 2 – 30 $^\circ C$; 3 – 32 $^\circ C$; 4 – 35 $^\circ C$; 5 – 37 $^\circ C$; 6 – 42 $^\circ C$; 7 – 50 $^\circ C$

Таким чином, уточнено вплив температури на режим роботи НРС у діапазоні 20-50 $^\circ C$. Встановлено, що час початку зростання об'єму структурних новоутворень експоненціально залежить від температури навколишнього середовища. Аналіз результатів випробувань НРС на стенді в температурному полі 11-36 $^\circ C$ дозволив встановити емпіричну залежність величини тиску розширення НРС при терміні твердіння 24 години (P_{24}) від температури (T) навколишнього середовища, яка має коефіцієнт апроксимації $R^2 = 0,98$

$$P_{24} = 17,27 \ln(T) - 27,98, \text{ МПа}$$

Експериментально встановлено, що існуючі суміші здатні при терміні твердіння 24 години розвивати тиск, в умовах близьких до ідеально жорстких,

до 52 МПа. Збільшення об'єму НРС при розширенні призводить до зниження внутрішніх напружень. При цьому в перші 8 годин розвивається 65-70% від P_{24} . Такий тривалий період росту тиску розширення є серйозним недоліком при застосуванні НРС для руйнування гірських порід, особливо в умовах підземних гірничих виробок. Висока чутливість до температури та режим роботи обмежений діапазоном $+5...+25^{\circ}\text{C}$ істотно ускладнюють застосування НРС для руйнування гірських порід, температура яких, як правило, вище верхньої межі вказаного діапазону. За таких умов відбувається мимовільний викид суміші з шпурів. Виходячи із зазначених недоліків НРС стосовно до руйнування гірських порід, основними завданнями є: підвищення тиску розширення, скорочення часу набору тиску, запобігання мимовільних викидів і підвищення робочого діапазону температур.

Підвищення ефективності роботи НРС пропонується розвивати за двома напрямками: штучним впливом фізичними полями і хімічним способом. Способи фізичного впливу запропоновані на підставі результатів лабораторних експериментів. Вони забезпечують: підвищення тиску розширення і прискорення його зростання шляхом попереднього стиснення суміші в шпурі або свердловині, підвищення швидкості її гідратації за допомогою електричного поля, зниження ймовірності мимовільних викидів НРС та підвищення діапазону робочих температур за рахунок регулювання теплообмінних процесів. Підбір хімічних добавок і розробка модифікованих сумішей проводилися на підставі аналізу уявлень про природу розширення в'язучих речовин і рецептур сучасних НРС, метою яких було зниження термічної активності.

Експериментально встановлено, що попереднє стиснення НРС в діапазоні 0,26–17,5 МПа дозволяє підвищити тиск розширення в 1,05–1,37 рази (рис. 5). У результаті аналізу результатів випробувань НРС на стенді отримана залежність тиску розширення з терміном твердіння 24 години (P_{24}) від попереднього стиснення (P_0), яка має коефіцієнт апроксимації $R^2 = 0,96$

$$P_{24} = -0,066P_0^2 + 2,132P_0 + 30,441, \text{ МПа}$$

Проведені дослідження були покладені в основу нового способу руйнування гірських порід. Встановлено, що дія електричного поля на НРС викликає підвищення швидкості реакції гідратації (рис. 6).

Вплив на зразок НРС напруги (U) в діапазоні 5-60 В, при відстані між електродами 7 см, підвищує швидкість реакції до 300 разів (рис. 6). Отримано коефіцієнти прискорення реакції (k_u), які задовільно описуються експоненціальною залежністю, наприклад, для відстані між електродами 7 см з коефіцієнтом апроксимації $R^2 = 0,98$

$$k_u = 1,237e^{0,0912U}$$

Спостерігається тенденція зниження коефіцієнту прискорення реакції при збільшенні відстані між електродами. Встановлено два режими гідратації в електричному полі.

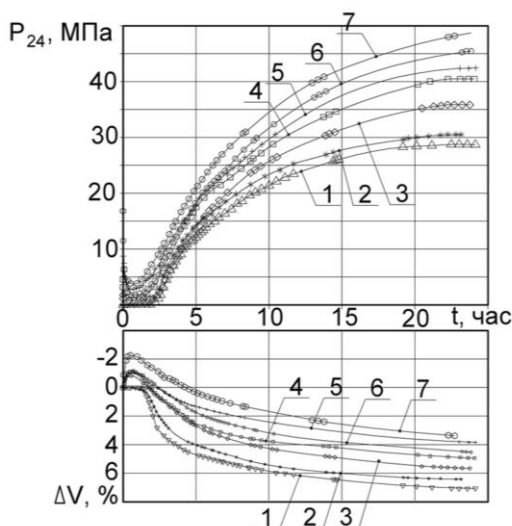


Рисунок 5 – Графіки зміни тиску розширення (P_{24}) і об'єму (ΔV) НРС у часі (t) при попередньому стисненні: 1 – 0 МПа; 2 – 0,26 МПа; 3 – 1,75 МПа; 4 – 4,37 МПа; 5 – 8,75 МПа; 6 – 11,37 МПа; 7 – 17,5 МПа

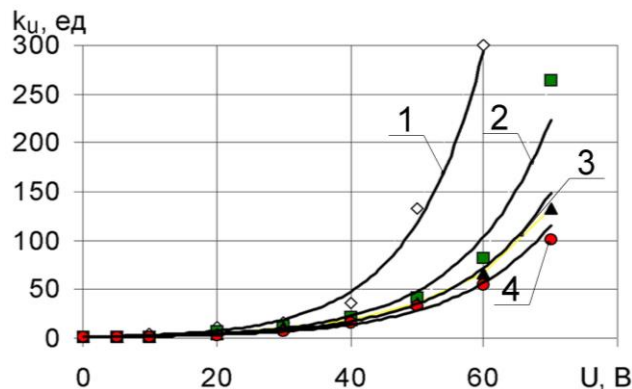


Рисунок 6 – Графіки залежності коефіцієнта прискорення гідратації НРС (k_u) від величини електричної напруги (U), при відстані між електродами: 1 – 7 см; 2 – 14 см; 3 – 21 см; 4 – 30 см

У першому (стабільному) режимі відбувається прогресуюче, з невеликою швидкістю, руйнування масиву, викликане збільшенням об'єму твердої фази розчину НРС. У другому (динамічному) режимі відбувається некероване зростання швидкості гідратації і руйнування гірських порід з високою швидкістю, близьке до вибуху, викликане збільшенням об'єму газоподібної фази.

Встановлено вплив величини напруги і часу ініціювання НРС на частку твердої фази продуктів розширення і режим руйнування. Проведені дослідження дозволили розробити та запатентувати способи руйнування гірських порід. Експериментально встановлено, що НРС, вміщений при однаковій температурі в матеріали з різними теплофізичними властивостями, має різну швидкість гідратації, а також різну швидкість і абсолютну величину збільшення об'єму. За критерій, що дозволяє врахувати теплофізичні властивості матеріалів, доцільно прийняти коефіцієнт температуропровідності. Таким чином, управління процесом гідратації може бути досягнуто шляхом вміщення розчину НРС в оболонки. На підставі проведених досліджень запропонована технічна реалізація отриманого ефекту у вигляді способу руйнування твердих тіл.

Розроблено модифіковані НРС з додаванням портландцементів, етанової кислоти і гумату натрію, що орієнтовані на застосування в умовах підземних гірничих виробок, а також проведені дослідження їх властивостей.

Виконані дослідження дозволили розробити аналітико-експериментальний метод розрахунку динаміки зростання тиску розширення НРС залежно від допустимих об'ємних змін системи, температури і попереднього стиснення. Отримані результати дозволяють застосовувати НРС для вирішення завдань руйнування та управління НДС масиву в різних гірничо-геологічних умовах.

У четвертому розділі проведено обґрунтування технологічних параметрів невибухового руйнування гірських порід, розроблено способи руйнування порід при вирішенні різних технологічних завдань гірничого виробництва.

На підставі аналізу механізму руйнування за допомогою НРС, дослідженого на моделях із каніфолі і гранітних блоках у природних умовах, встановлені особливості цього процесу. При такому руйнуванні зона подрібнення навколо заряду відсутня, розвивається одна або декілька тріщин. Комплексні дослідження включали аналітичні методи, лабораторне моделювання та натурні спостереження. Вони дозволили встановити, що процес руйнування порід навколо шпуру з НРС проходить у два етапи. Перший етап характеризується початковим стрімким зростанням розмірів радіальних тріщин, у результаті вивільнення накопиченої в процесі росту структурних новоутворень у НРС пружною потенційної енергії та її переходу в поверхневу. Другий – зупинкою зростання і подальшим розкриттям берегів тріщин, яке має спадаючий ступінчастий характер, відповідно до розширення НРС у шпурі.

Відмінність характеру і механізмів вибухового і квазістатичного руйнування дозволяє зробити висновок, що для розрахунку параметрів руйнування за допомогою НРС не підходять методики і підходи, які використовуються при БВР.

Аналіз сучасних уявлень про руйнування твердих тіл показав, що найбільш повне відображення особливостей руйнування гірських порід за допомогою НРС може бути визначено на підставі локального силового критерію Грифітса-Ірвіна, з позицій якого запропонована модель руйнування масиву з урахуванням існуючого поля напружень. Отримана залежність для визначення відстані між шпурами з НРС

$$L_{mp} = \frac{((P^2 + \sigma_1^2) + (P^2 + \sigma_2^2) + (P^2 + \sigma_3^2) - 2\mu_{НРС}((P^2 + \sigma_1\sigma_2) + (P^2 + \sigma_2\sigma_3) + (P^2 + \sigma_3\sigma_1))) \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{4E_{НРС} \cdot K_I^2} \quad (1)$$

де P – тиск розширення НРС, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження в масиві, МПа;

$\mu_{НРС}$ – модуль поперечної деформації НРС;

r_0 – радіус шпуру, м;

E_M – модуль пружності породи, МПа;

$E_{НРС}$ – модуль пружності НРС, МПа;

K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа $\cdot(\sqrt{м})$.

У випадку, коли на породи не діють зовнішні напруження, або їх величиною можна знехтувати, вираз (1) має вигляд

$$L_{mp} = \frac{3P^2 \cdot \pi \cdot r_0^2 E_M}{8E_{НРС} \cdot K_I^2} (1 - 2\mu_{НРС}), \text{ м} \quad (2)$$

Для забезпечення спрямованого руйнування запропоновано спосіб зміни рівномірного поля напружень у навколошпуровій області за допомогою спеціальних патронів, що дозволяють сформувати у потрібному напрямку зони концентрації розтягуючих напружень. Силкові елементи патрона являють собою дві складові частини, отримані поздовжнім діаметральним розрізом труби, що встановлюються в шпур із зазором. Розміщення НРС у шпурових патронах забезпечує виникнення в гірській породі, в одному з діаметральних напрямків шпуру, зон підвищених розтягуючих напружень. Це створює умови зростання магістральної тріщини від стінок шпуру. При цьому запобігається руйнування в напрямках, що не збігаються з магістральною тріщиною. Дослідження розподілу напружень у навколошпуровій області проводили МСЕ.

На підставі аналізу результатів моделювання встановлено, що при зазорі (a) між силковими елементами патрона НРС 4-27% від діаметра шпуру (d), коефіцієнт концентрації напружень k_{σ_1} на стінках шпуру становить 1,9 – 4. При цьому він описується з коефіцієнтом апроксимації $R^2=0,95$ статечною залежністю

$$k_{\sigma_1} = 1,078 \left(\frac{a}{d} \right)^{-0,424}$$

Відстань між шпурами при спрямованому руйнуванні гірських порід визначається за залежністю (1), в яку додатковим множником вводиться наведений вище коефіцієнт концентрації напружень k_{σ_1} .

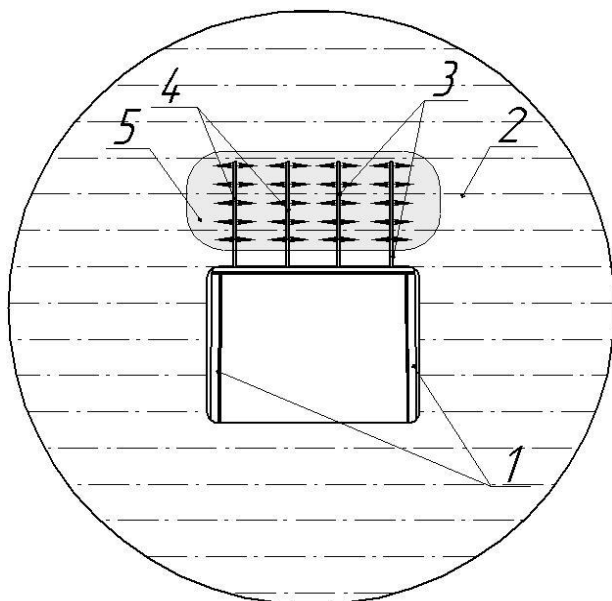
На основі отриманих результатів розроблений спосіб проведення гірничих виробок. Він включає виймання корисної копалини, подальшу відбійку порід, навантаження зруйнованих порід на засіб транспорту. При цьому відбійка проводиться шляхом буріння шпурів рядами, розташованими паралельно площині відслонення, утвореної в результаті виїмки корисної копалини, і розміщення у них НРС. Розроблено спосіб ремонту гірничих виробок, який включає визначення орієнтації системи кліважних тріщин у зміщених у порожнину виробки породах, посилення кріплення; ослаблення замків на рамах деформованого кріплення та відбійку порід, зміщених у порожнину виробки шляхом буріння шпурів і розміщення в них НРС. При цьому шпури бурять по лініям, еквідистантним проектному контуру виробки, а після обвалення порід до проектного контуру демонтують деформовані рами кріплення, і зводять рами нового кріплення в проектному контурі. В наведених способах руйнування порід досягається із збереженням природної міцності і несучої здатності приконтурної зони. Розроблено спосіб боротьби з підняттям підшви гірничих виробок, в якому за рахунок спрямованого локального квазістатичного впливу на породи підшви, досягається їх руйнування з мінімальними енерговитратами і з збереженням суцільності законтурної частини виробки. Обґрунтовано методики визначення параметрів розроблених способів.

Для підвищення безпеки робіт, виключення травм внаслідок мимовільного викиду НРС розроблені способи герметизації шпурів і проведено дослідження їх

ефективності. Визначена область раціонального застосування запропонованих способів герметизації шпурових зарядів НРС. Так, герметизація швидкотвердіючим розчином «Бі-кріплення» доцільна в умовах, коли очікуваний час руйнування понад 60 хв, при цьому глибина інкапсуляції повинна бути не менше діаметра шпура. При меншому часі руйнування доцільно як засіб герметизації використовувати смолу полімерних ампул для хімічного анкерування.

У п'ятому розділі наведено результати досліджень управління напружено-деформованим станом масиву гірських порід невибуховими руйнуючими сумішами в гірничих виробках.

На підставі аналізу та узагальнення існуючих досліджень і проведених шахтних вимірювань встановлено, що основний резерв підвищення стійкості виробок на етапі їх проведення полягає в збереженні природної міцності і суцільності порід приконтурної зони. Проведення виробок призводить до виникнення зон підвищених і знижених напружень в масиві, що створює передумови для руйнування порід. У даний час експериментальними роботами однозначно доведено, що збільшення проміжного напруження в породах призводить до зростання їх міцності в об'ємному полі напружень. Ці міркування дозволили розробити концепцію управління НДС масиву гірських порід,



засновану на штучній зміні компонентів напружень навколо гірничої виробки, і наближенні їх поля до природного. Технічна реалізація запропонованої ідеї здійснена в розробленому способі кріплення гірничих виробок (рис. 7) наступним чином: на етапі проведення виробки, після встановлення рам основного кріплення, в приконтурні породи бурять шпури, в які розміщують НРС, розширення якого призводить до підвищення напружень в напрямку перпендикулярному осям шпурів.

Рисунок 7 – Спосіб кріплення гірничої виробки, заснований на штучній зміні компонентів напружень у масиві: 1 – рама основного кріплення; 2 – приконтурні породи; 3 – шпури; 4 – НРС; 5 – зона стиснення порід НРС

Дослідження способу було проведено шляхом математичного моделювання МСЕ. Аналіз результатів дозволив встановити, що розширення НРС сприяє створенню навколо виробки стиснутої області, що перешкоджає розшаруванню порід і виключає утворення зони розвантаження в породах покрівлі виробки.

На підставі моделювання МСЕ визначена зона впливу шпуру з НРС у суцільному середовищі. Встановлено залежність відстані між шпурами a

радіусом r_0 від тиску НРС $P(t_i, P_{0i})$, з міркувань дотику зон впливу сусідніх шпурів з НРС при тиску на контактні зони впливу $P_{звм} 0,05-0,1 P(t_i, P_{0i})$

$$a = \frac{2r_0}{\frac{P_{звм}}{1,266 \cdot P(t_i, P_{0i})} \cdot \frac{1}{1,242}}, \text{ м} \quad (3)$$

На комбінуванні ефектів анкерування та стиснення порід заснований новий спосіб кріплення гірничих виробок. Він включає буріння шпурів, встановлення та закріплення в них механічним способом трубчастих ін'єкційних анкерів, нагнітання в зоні інтенсивної тріщинуватості через перфоровану частину ін'єкційних анкерів НРС. При цьому перед установкою трубчастого анкера на нього надягають еластичну оболонку. Анкер закріплюють при проведенні гірничої виробки, а нагнітання НРС в еластичну оболонку здійснюють на стадії утворення зони зруйнованих порід, після нагнітання НРС гирлову частину ін'єкційного анкера герметизують.

На шахтах Міністерства енергетики та вугільної промисловості України проведено натурні спостереження за деформуванням масиву навколо виробок, що ремонтуються з присічкою бічних порід. У результаті встановлено, що в умовах високого ступеня подрібнення порід вектор їх максимальних зсувів орієнтований нормально нашаруванню, зона впливу вибою перекріплення, в якій спостерігається інтенсивне зміщення, що обмежується ділянкою близько 10 м перед вибоєм і 6-8 м позаду вибою. При цьому максимальна частка зсувів реалізується на ділянці 4 м перед вибоєм перекріплення. На ділянці 2-6 м позаду встановленої рами кріплення також спостерігаються інтенсивні зсуви, які носять спадаючий характер, і стабілізуються вже через 10 м позаду вибою перекріплення.

В умовах блочно-структурованого масиву з вираженою кліважною системою рух структурних блоків у напрямку виробки відбувається по площинах ковзання в масиві, наприклад, кліважним тріщинам. Це призводить до виникнення горизонтальної складової зрушень і, зокрема, до нахилу рам кріплення в напрямку поздовжньої вісі виробки. При цьому 70% вертикальної конвергенції в зоні впливу вибою перекріплення і 75% нахилу рам у напрямку поздовжньої осі виробки відбувається на ділянці 3,5-4,5 м перед вибоєм перекріплення. За результатами замірів кут нахилу сягав 45 градусів, а максимальна вертикальна конвергенція 0,68 м. Результати замірів для ділянки з блочною структурою порід в зруйнованій зоні наведено на рис. 8.

Різний характер деформування структурно-неоднорідних порід зумовлює, передачу тиску від НРС вглиб масиву при навантаженні за залежністю близькою до квадратичної. Це пояснюється послідовним ущільненням і перепакуванням дискретних елементів у напрямку від зони, ближньої до заряду НРС, вглиб масиву. Коефіцієнт передачі тиску підвищується при збільшенні абсолютного значення тиску НРС. При розвантаженні передача тиску від контуру зони впливу до заряду НРС відбувається не шляхом навантаження, а більш полого, не повертаючись при цьому у початкове значення.

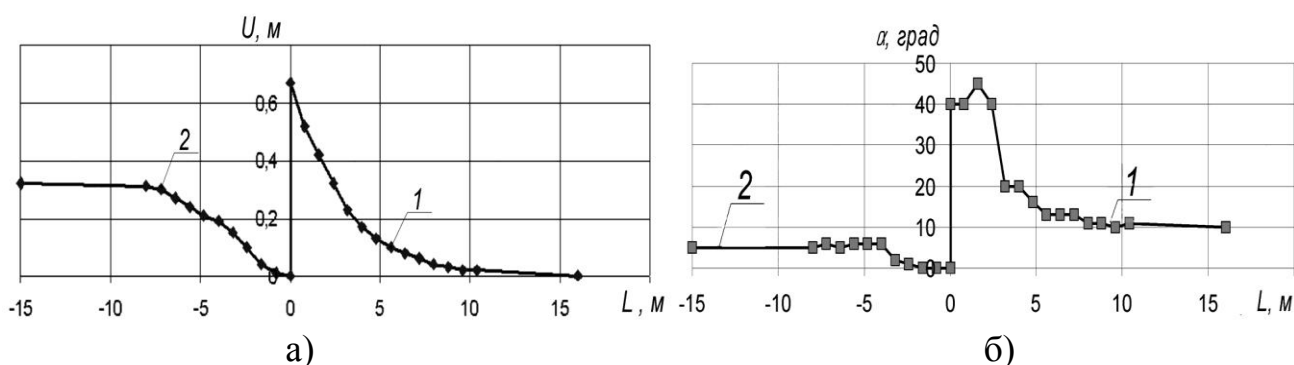


Рисунок 8 – Графіки вертикальної конвергенції (а) і зміни кута нахилу рам кріплення (б) з боку виробленого простору лави по замірним станціям: 1 – на ділянці попереду вибою перекріплення; 2 – за вибоєм перекріплення

Спостерігається запізнення передачі тиску. Так, у лабораторних експериментах, зростання тиску на межі зони впливу НРС розпочинається після досягнення тиску в зарядній камері 7-10 кПа. При зменшенні тиску в зарядній камері, на початку розвантаження, на межі зони впливу тиск деякий час продовжує зростати. Коефіцієнт передачі тиску та інтенсивність його зміни залежать від виду дискретних елементів, їх розміру, величини абсолютного тиску. На підставі проведених досліджень отримана емпірична залежність тиску (P_2), що формується на відстані (R_2) від стінок шпуру радіусом (R_1), в який поміщений НРС з тиском (P_1)

$$P_2 = \frac{(1,1116e^{-0,2787 \frac{R_2}{R_1}}) \cdot P_1}{n}, \text{ МПа} \quad (4)$$

де n – коефіцієнт зниження тиску розширення в дискретному матеріалі, який визначається експериментальним шляхом.

Приймаючи тиск на контактні зони впливу сусідніх шпурів, наприклад, 5% від тиску НРС, встановлюємо необхідну відстань між шпурами, яка становить 0,4-0,6 м.

На підставі результатів досліджень розроблено й запатентовано новий спосіб кріплення гірничих виробок, проведених в породах схильних до здимання і спосіб підвищення стійкості підшви гірничої виробки. В результаті експериментальних робіт встановлено ефект підвищення несучої здатності зруйнованих гірських порід, представлених блочно-дискретним середовищем при їх розпорі НРС, розміщеними в шпурах. На цьому ефекті засновані способи зміцнення гірських порід у процесі підтримання виробки.

Обробка результатів моделювання МСЕ, надає можливість отримати залежність для визначення відстані між шпурами з НРС при реалізації способу:

$$a_{шп} = (0,8 \div 1,0) \left(\frac{P_{нрс} \cdot l_{шп}}{(0,0155k_{тп}^{-0,7}) \cdot H \cdot \gamma} \right), \text{ м} \quad (5)$$

де $P_{нрс}$ – тиск НРС на стінки шпуру, МПа;

$l_{\text{шт}}$ – довжина шпур, м;

$k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт зовнішнього тертя породи;

H – висота можливого вивалу, м;

γ – максимальна питома вага порід контуру виробки, кг/м^3 .

Аналіз результатів шахтних спостережень за зрушенням порід навколо виробок, що підтримуються за лавою, дозволив встановити, що:

– динаміка вертикальних і горизонтальних зміщень порід покрівлі штреку, зростання навантаження на охоронну смугу і стійки на ділянці сполучення штреку з лавою має стрибкоподібний характер, що пов'язано з процесами руйнування покрівлі в масиві;

– в умовах вираженого кліважу порід покрівлі, при нахилі тріщин у бік виробленого простору зростає горизонтальна компонента зсувів уздовж траси виробки, абсолютна величина якої збільшується за законом близьким до логарифмічного, при цьому в напрямку поздовжньої осі виробки спостерігається нахил рам, який сягає 25 градусів;

– середньодобовий приріст тиску на стійку, встановлену на кінцевій ділянці лави, становить 7,2 т. Вплив виробничих процесів на зростання величини тиску на стійки спостерігається на ділянці від вибою лави до місця зведення охоронної смуги і має спадаючий характер. Середній тиск по ряду стійок на контурі охоронної смуги на відстані 6 м від вибою складає 4,6-4,8 МПа, на відстані 10 м від вибою - 8-8,4 МПа. Тиск на охоронну смугу через 12 годин після її зведення 0,5-0,53 МПа, через 3 доби - 4,8-5,2 МПа;

– втрата висоти очисної виробки на кінцевій ділянці при відстані 0-20 м від площини вибою складає 33-37%, при цьому 15-17% конвергенції реалізується на ділянці від вибою до охоронної споруди.

Дослідження МСЕ зміни НДС породного масиву навколо виробок, що підтримуються за лавою, дозволили встановити, що зміна жорсткості охоронної споруди призводить до зміщення екстремуму напружень, що виникають в основній покрівлі відносно підготовчої виробки (рис. 9). Це, у свою чергу, визначає місце руйнування порід покрівлі на межі з виробкою, що охороняється за лавою. При жорсткості смуги більше ніж вугільного пласта $c_n/c_y > 1$ область максимальних напружень формується в породах основної покрівлі над охоронною спорудою (рис. 9 б, 10 а) у верхній частині породної консолі. За цих умов породи в області максимуму перебувають у стані узагальненого зсуву (рис. 10 б).

На рис. 10 початок координат по вісі абсцис співпадає з точкою перетину вісі виробки з лінією, проведеною по верхній межі шару основної покрівлі. Руйнування основної покрівлі найбільш вірогідне над охоронної смугою, що сприяє збереженню стійкості виробки. Але таку високу жорсткість мають тільки литі смуги за умови їх вступу в роботу в найкоротші терміни після зведення, що в практиці вугільних шахт України зустрічається досить рідко. Найчастіше жорсткість смуги нижче жорсткості вугілля $c_n/c_y < 1$, за таких умов область максимальних напружень формується в породах основної покрівлі над пластом у верхній частині породної консолі (рис. 9 а, 10 а).

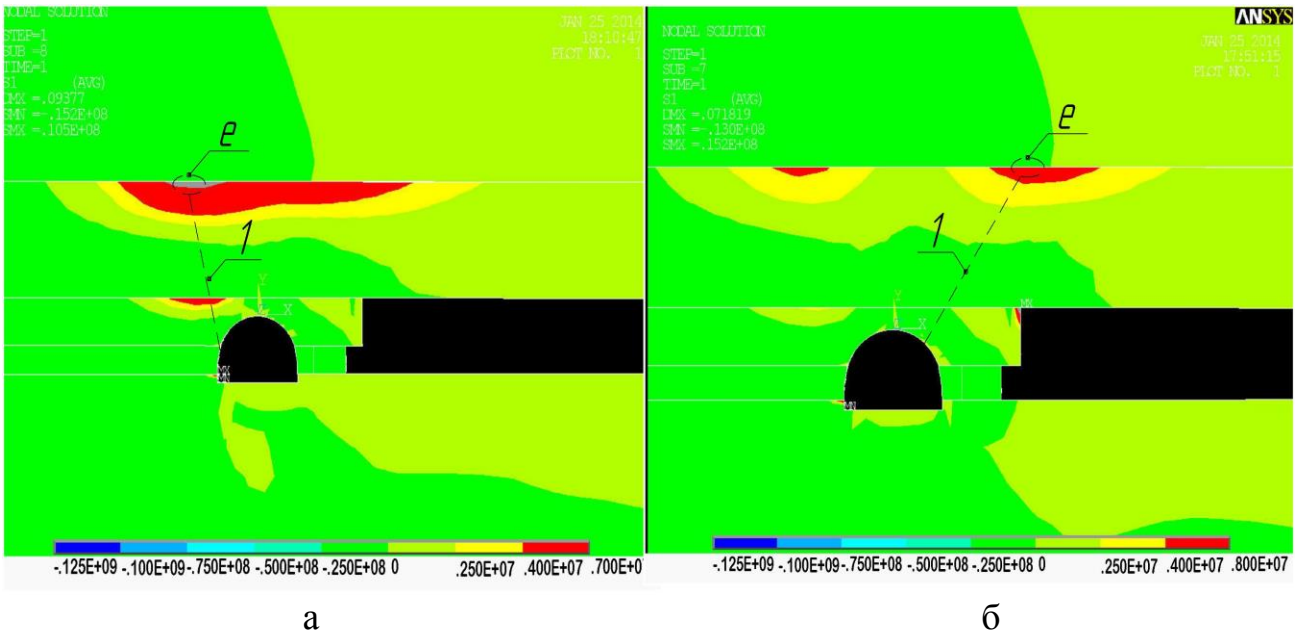


Рисунок 9 – Розподіл головних напружень $S1$ (σ_1) навколо гірничої виробки, що підтримується за лавою, при питомій жорсткості смуги 0,2 ГН (а) та 2 ГН (б): е – область екстремуму напружень в основній покрівлі; 1 – найбільш ймовірна лінія руйнування покрівлі

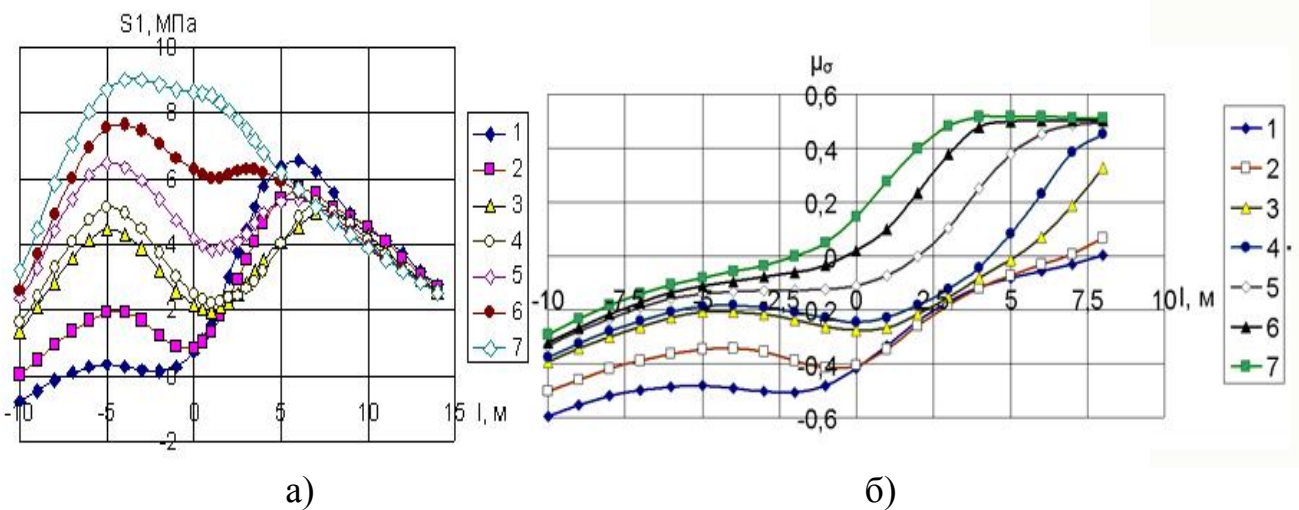


Рисунок 10 – Розрахункові головні напруження $S1$ (σ_1) (а) і вид напруженого стану μ_σ (б) по лінії, проведеній по верхній межі шару основної покрівлі, при жорсткості охоронної смуги: 1 – 12 ГН, 2 – 6 ГН, 3 – 2 ГН, 4 – 1,2 ГН, 5 – 0,6 ГН, 6 – 0,2 ГН, 7 – 0,02 ГН

Породи, також, знаходяться в стані близькому до узагальненого зсуву (рис. 10 б). Найвірогідніше руйнування покрівлі над вугільним пластом, наслідком чого стає значна втрата перерізу виробки. Ці результати підтверджуються експериментами на моделях з еквівалентних матеріалів.

Встановлено, що охоронна смуга навантажується нерівномірно – з боку виробленого простору більш ніж з боку виробки у 1,5-1,6 рази. При цьому зі зменшенням жорсткості смуги тиск на неї за площею вирівнюється. Збільшення довжини консолі у виробленому просторі призводить до зростання напружень в

основній покрівлі за поліноміальним законом. Максимальний вплив довжини консолі спостерігається над виробкою та охоронної смугою, де формуються максимальні напруження $S1$ (σ_1).

Проведені шахтні, лабораторні та математичні дослідження дозволили зробити висновок, що основний резерв забезпечення стійкості виробок, що підтримуються за лавою, полягає в управлінні часом і місцем обвалення консолі основної покрівлі у виробленому просторі. Це може бути досягнуто або застосуванням охоронних смуг високої жорсткості, з швидким вступом в роботу, або шляхом штучної зміни НДС порід з формуванням зон критичних напружень в покрівлі, що викликають її обвалення. Мінімізація енерговитрат на примусове обвалення консолі може бути досягнута за рахунок ініціювання руйнування в зоні природних розтягуючих напружень вище нейтральної осі шару порід основної покрівлі, що зависає. Для технічної реалізації цієї ідеї розроблено спосіб охорони підготовчих виробок (рис. 11).

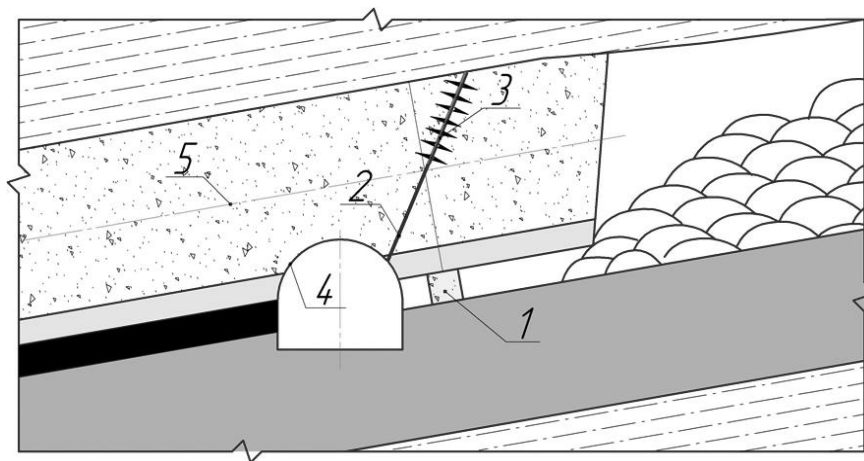


Рисунок 11 – Спосіб охорони підготовчих виробок, пройдених по пласту: 1 – охоронна споруда, 2 – розвантажувальна свердловина, 3 – НРС, 4 – підготовча виробка, 5 – основна покрівля

Спосіб включає зведення охоронної споруди за лавою, буріння свердловини з підготовчої виробки, заповнення її донної частини НРС і герметизацію гирла. Свердловину бурять таким чином, щоб її вісь проходила через точку, утворену перетином нейтральної вісі шару основної покрівлі та нормалі до нашарування, проведеної з центру мас охоронної споруди. Для оцінки впливу тиску НРС у свердловині на локалізацію області максимальних головних напружень в основній покрівлі за різної жорсткості охоронної споруди були проаналізовані напруження у верхній частині породної консолі (рис. 12, 13).

Встановлено, що розроблений спосіб надає можливість забезпечити зміну НДС у масиві таким чином, щоб область максимальних напружень σ_1 формувалася над охоронною спорудою (рис. 12), а їх величина перевищувала граничні (рис. 13). Це призведе до руйнування основної покрівлі над охоронною спорудою, навіть при її жорсткості на 2 порядки менше жорсткості

вугілля. При цьому необхідний тиск розширення НРС має бути в 1,14 разів більше граничної міцності порід основної покрівлі на одноосьове розтягування $[\sigma_p]$, а при тиску розширення НРС $4,3[\sigma_p]$ напруження $[\sigma_{1max}]$ над охоронною спорудою в 1,6-1,8 рази вище, ніж з боку вугільного пласта і за абсолютною величиною перевищують $[\sigma_p]$ у 3 рази (рис. 13).

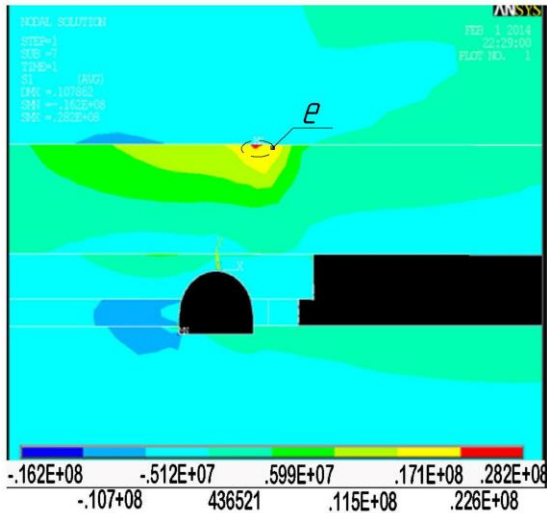


Рисунок 12 – Розподіл головних напружень σ_1 навколо гірничої виробки, що підтримується за лавою, при тиску НРС 30 МПа: е – область екстремуму напружень в основній покрівлі

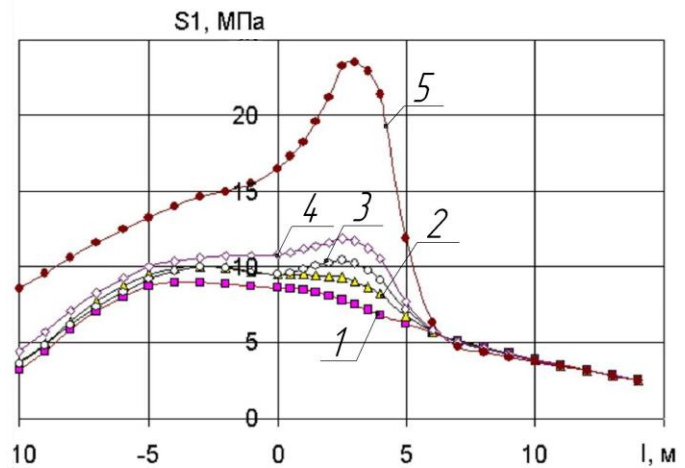


Рисунок 13 – Розрахункові напруження S_1 (σ_1) по верхній площині шару основної покрівлі, при жорсткості охоронної смуги 0,02 ГН і тиску НРС: 1 – 0, 2 – $0,43 [\sigma_p]$, 3 – $0,71 [\sigma_p]$, 4 – $1,14 [\sigma_p]$, 5 – $4,3 [\sigma_p]$

Другим напрямом формування умов для обвалення основної покрівлі над охоронною спорудою є створення зон критичних напружень в нижній частині покрівлі. Цей напрямок може бути реалізовано у випадках, коли безпосередня покрівля має невелику потужність або міцність, співрозмірну з міцністю основної покрівлі. Руйнування в покрівлі відбувається охоронною спорудою з різучим елементом, що реалізовано в розроблених способах охорони підготовчої виробки.

У шостому розділі наведені результати промислових випробувань руйнування гірських порід і управління їх НДС за допомогою НРС.

Випробування та впровадження способів і засобів невибухового руйнування були проведені в умовах Хлібодарівського кар'єроуправління, що розробляє інтрузивні кристалічні породи, представлені гранітоїдами. За вісьмома відібраними на кар'єрі пробам межа міцності при стисненні в повітряно - сухому стані становила 58,0-163,4 МПа (середнє значення – 94,6 МПа). Випробування способу спрямованого руйнування дозволили підтвердити його ефективність і достовірність розрахунку параметрів. Економічний ефект від реалізації розробленого способу руйнування за допомогою НРС склав 13,3 грн/1 м³ породи за цінами 2013 року.

Шахтні випробування способів невибухового руйнування негабаритних блоків пісковика міцністю на одновісний стиск 60-85 МПа проводилися в 4 південному конвеєрному штреку центральної панелі бл. 8 ПАТ «Шахтоуправління «Покровське». Також були проведені дослідно-промислові випробування способу боротьби зі здиманням підшви гірничих виробок; породи підшви виробки на експериментальній ділянці були представлені пісковиками дрібнозернистими з міцністю на одновісний стиск 38-85 МПа. Дослідження підтвердили працездатність способів. Отримано позитивний результат від реалізації способу зміцнення гірських порід за допомогою НРС в умовах ВП «Шахта Добропільська» ДП «Добропіллявугілля», а також апробовані способи ремонту і перекріплення гірничих виробок.

За отриманими результатами досліджень розроблені та затверджені МакНДІ «Рекомендації по застосуванню невибухових руйнуючих складів в умовах підземних гірничих виробок вугільних шахт Донбасу». Запропонований у роботі спосіб руйнування за допомогою НРС є одним з варіантів впливу на привибійну частину масиву в СОУ-П 10.1.00174088.031: 2011 «Контроль за проведенням способів і технологічних процесів за параметрами акустичного сигналу під час розкриття схильних до ГДЯ вугільних пластів». Розроблено та затверджено стандарт підприємства СТП (02070826) (33161769): 2014 «Методика визначення параметрів руйнування гірських порід в підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей».

Сумарний річний ефект від впровадження рекомендацій склав 1,46 млн грн.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена актуальна нова наукова проблема встановлення закономірностей формування НДС при застосуванні невибухових руйнуючих сумішей з урахуванням кінетики їх гідратації в шпурових і свердловинних зарядах у часі, конструкції зарядів, впливу технологічних фізичних процесів для управління станом гірських порід при відновленні експлуатаційного перетину гірничих виробок і забезпеченні їх стійкості на різних етапах підтримання.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблено методики: визначення фазового стану розчинів НРС в процесі гідратації методом ЯМР спектроскопії, визначення фізико-механічних властивостей НРС в типових деформаційних режимах за допомогою УНТС, визначення фізико-механічних властивостей НРС в умовах шпурових і свердловинних зарядів.

2. В результаті експериментальних досліджень розвинені уявлення про розширення НРС на основі оксиду кальцію в процесі гідратації. Встановлені чотири стадії гідратаційного твердіння та розширення розчину НРС, які характеризуються зміною фазового стану води в розчині, динамікою розширення системи та інтенсивністю тепловиділення. При цьому максимальне розширення НРС відбувається на третій стадії гідратаційного твердіння і супроводжується переходом води в розчині з вільної фази в хімічно зв'язаний

стан. Визначено вплив зовнішніх факторів на швидкість протікання реакції на кожній стадії роботи НРС. Встановлено, що гідратаційне твердіння в умовах жорсткої оболонки протікає більш інтенсивно, характеризується різкою зміною фазового стану води з адсорбованого в пов'язаний.

3. Встановлено закономірності зміни кінетики розширення НРС від коефіцієнта розширення суміші, температури навколишнього середовища, попереднього стиснення, впливу електричного поля, введення етанової кислоти і гумату натрію, що дозволяє регулювати швидкість гідратації і тиск розширення НРС при вирішенні завдань руйнування гірських порід і управління їх НДС. При розширенні НРС тиск у гірських породах змінюється за логарифмічною залежністю від жорсткості системи «НРС-масив», температури і впливу електричного поля. Попереднє стиснення НРС 0,26-17,5 МПа збільшує за квадратичною залежністю тиск розширення в 1,05 – 1,37 рази.

4. Визначені особливості динаміки розширення НРС у різних просторових напрямках у різних деформаційних режимах. Так, при розміщенні НРС в замкнену камеру тиск його розширення і збільшення об'єму визначається опором стінок камери у відповідному напрямку. Зростання тиску забезпечує не весь об'єм НРС в зразку, а його частина, що знаходиться в безпосередній близькості від межі з камерою в яку він розміщений. Модуль деформації НРС E також залежить від деформаційного режиму системи. При розширенні суміші близькому до нуля $E = 1987,3e^{0,1182 \cdot \sigma_{cp}}$, а при розширенні до 13,6% – $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$. При цьому модуль поперечної деформації при розширенні НРС не залежить від деформаційного режиму і дорівнює 0,235-0,255.

5. Встановлено особливість руйнування порід навколо шпуру з НРС. Вона полягає в первісному стрімкому проростанні радіальних тріщин, в результаті вивільнення накопиченої пружної потенційної енергії та її переходу в поверхневу, зупинкою їх зростання і подальшим розкриттям берегів тріщин, яке має спадаючий ступінчастий характер, за мірою зростання тиску розширення НРС у шпурі. На підставі локального силового критерію Грифітса-Ірвіна розроблено модель руйнування гірських порід НРС з урахуванням існуючого поля напружень.

6. У результаті математичного моделювання встановлено, що при розміщенні у шпур двоелементного патрона НРС на стінках шпуру створюються розтягуючі напруження. Коефіцієнт концентрації напружень описується зворотною статечною залежністю відносини зазору між оболонками патрона до діаметру шпуру. При зазорі 4 – 27% від діаметра шпуру коефіцієнт концентрації напружень дорівнює 1,9–4. Розроблені та апробовані способи і засоби спрямованого руйнування гірських порід за допомогою НРС при руйнуванні негабаритів, проведенні та відновленні експлуатаційного стану виробок.

7. Розроблено концепцію управління НДС масиву гірських порід, яка заснована на примусовій зміні компонентів напружень навколо гірничої виробки, за рахунок примусового стиснення масиву при розширенні НРС розміщених у шпури. Запропонована її технічна реалізація в розроблених

способах кріплення гірничих виробок. З допомогою МСЕ визначена зона впливу шпуру із НРС у суцільному середовищі, що дозволило визначити параметри запропонованих способів.

8. Експериментально встановлено, що передача тиску від заряду НРС вглиб масиву, представленого дискретним середовищем, при навантаженні відбувається за залежністю близькою до квадратичної, що пояснюється послідовним ущільненням і перепакуванням дискретного матеріалу в напрямку від зони, ближньої до заряду НРС, вглиб масиву. Коефіцієнт передачі тиску підвищується при збільшенні абсолютного значення навантаження на внутрішньому контурі, а при розвантаженні передача тиску від контуру зони впливу до заряду НРС відбувається не шляхом навантаження, а більш полого, при цьому спостерігається запізнювання передачі тиску.

9. Встановлено ефект підвищення несучої здатності зруйнованих гірських порід, представлених блочно-дискретним середовищем, при їх розпорі НРС вміщеними в шпурах. Розроблено способи зміцнення гірських порід у процесі підтримання виробки. Визначено, що відстань між шпурами прямо пропорційна тиску НРС, довжині шпуру, коефіцієнту зовнішнього тертя порід і обернено пропорційна їх питомій вазі і висоті можливого вивалу.

10. Розвинуті уявлення про механізм руйнування масиву навколо виробки, що підтримується за лавою. Зокрема встановлено, що жорсткість охоронної споруди c_n суттєво впливає на епюру максимальних головних напружень $[\sigma_{1max}]$, в основній покрівлі і місце її руйнування відносно підготовчої виробки. Так при жорсткості охоронної споруди більше вугільного пласта $c_n/c_y > 1$ область σ_{1max} у породах основної покрівлі формується над охоронною спорудою, вище нейтральної вісі породної консолі. При цьому породи в області максимуму напружень знаходяться у стані узагальненого зсуву, а руйнування основної покрівлі найбільш вірогідне над охоронною спорудою. Це сприяє збереженню стійкості виробки. У випадку, коли $c_n/c_y < 1$ область $[\sigma_{1max}]$ в породах основної покрівлі формується з боку пласта на відстані за нормаллю від боку виробки близько половини її ширини у верхній частині породної консолі, що створює умови для руйнування основної покрівлі з боку пласта. У цьому випадку зберегти стійкість виробки можна за допомогою примусового обвалення. При цьому охоронне спорудження навантажується більше з боку виробленого простору у 1,5-1,6 рази. Збільшення довжини породної консолі у виробленому просторі призводить до зростання σ_1 в основній покрівлі за поліноміальним законом.

11. Встановлено, що мінімізація енерговитрат на примусове обвалення породної консолі на межі з виробленим простором може бути досягнута за рахунок ініціювання руйнування за допомогою НРС у зоні природних розтягуючих напружень вище нейтральної вісі шару порід основної покрівлі. При цьому розміщення НРС у покрівлі викликає зміну градієнту і екстремуму

$[\sigma_{1max}]$ та збільшення напружень за лінійною залежністю від тиску розширення P , що дозволяє керувати часом та місцем обвалення основної покрівлі.

12. Розроблено та апробовано способи невибухового руйнування гірських порід, які засновані на управлінні кінетикою розширення НРС за допомогою попереднього стиснення в зарядній камері, регулюванні теплообмінних процесів між зарядом НРС і породами та впливі на НРС електричного струму. Випробування нових способів проведено на шахтах Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Розроблено модифіковані НРС з додаванням портландцементів, етанової кислоти, гумату натрію. Сумарний річний ефект від впровадження рекомендацій склав 1,46 млн грн.

13. Розроблено та затверджено МакНДІ «Рекомендації по застосуванню невибухових руйнуючих складів в умовах підземних гірничих виробок вугільних шахт Донбасу». Запропонований у роботі спосіб руйнування за допомогою НРС є одним з варіантів впливу на привибійну частину масиву в СОУ-П 10.1.00174088.031: 2011. Розроблено та затверджено стандарт підприємства СТП (02070826) (33161769): 2014 «Методика визначення параметрів руйнування гірських порід в підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей».

Основні наукові результати і положення дисертації відображені в 83 наукових працях, основні з яких:

1. Сахно И.Г. Лабораторные исследования работы невзрывчатых разрушающих веществ при упрочнении массивов разрушенных горных пород / Н.Н. Касьян, Н.А. Овчаренко, Ю.А. Петренко и др. // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2008. – №8. – С. 50 – 52.

2. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы разрушенных горных пород при формировании из них несущей конструкции / И.Г. Сахно, Ю.А. Петренко, Н.А. Овчаренко // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2008. – №16. С. – 70 – 81.

3. Сахно И.Г. Обгрунтування параметрів нової технології перекріплення виробок за допомогою методу скінчених елементів / М.М. Касьян, М.А. Овчаренко, І.Г. Сахно и др. // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2008. – №2. – С. 104 – 109.

4. Сахно И.Г. Лабораторные исследования явления передачи давления от саморасширяющегося состава мелкофракционным дискретным материалом / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2009. – №17. – С. 180 – 191.

5. Сахно И.Г. Особенности передачи давления, от стенок шпура, содержащего невзрывчатый разрушающий материал, вглубь породного массива / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк // Збірник наукових праць національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2010. – №34. Т.1 – С. 136 – 143.

6. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2010. – №18. – С. 135 – 149.

7. Сахно И.Г. Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ/ Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2010. – №2. – С. 209 – 219.

8. Сахно И.Г. Шахтные испытания нового способа укрепления разрушенных пород, основанного на применении невзрывчатых разрушающих веществ / Н.Н. Касьян, С.Ю. Гладкий, И.Г. Сахно, Н.А. Овчаренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна.– Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ».– 2011. – Вип. 14 (181). – С. 8 – 13.

9. Сахно И.Г. Повышение несущей способности разрушенных горных пород путем применения саморасширяющихся составов / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, С.Ю. Гладкий // Уголь Украины, 2011 – №5.– С. 12 – 16.

10. Сахно И.Г. Изучение причин самопроизвольного выброса невзрывчатых разрушающих веществ из шпуров / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян, А.О. Новиков и др. // Разработка рудных месторождений: сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2011. – Вип. 94. – С. 75–78.

11. Сахно И.Г. Опыт разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами в условиях шахты «Щегловская-Глубокая»/ И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян, В.Н. Мокриенко // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2011. – №1. – С. 15 – 22.

12. Сахно И.Г. Новый концептуальный подход к обеспечению устойчивости горных выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2011. – №5 (125). – С. 70 – 75.

13. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих составов в условиях их предварительного сжатия / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2011. – №19. – С. 109 – 123.

14. Сахно И.Г. Обоснование параметров разрушения горных пород с помощью невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 93. – С. 245 – 253.

15. Сахно И.Г. Особенности сдвижения породного массива в зоне ведения ремонта горных выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Наукові праці УКРНДМІ НАН України. – Донецьк, УКРНДМІ НАН України, 2012 – Вип. 10 – С. 296-308.

16. Сахно И.Г. Лабораторные исследования процесса передачи давления от заряда невзрывчатого разрушающего вещества в дискретной среде / И.Г. Сахно // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2012. – №1. – С. 241 – 249.

17. Сахно И.Г. Особенности конвергенции пород и пространственного перемещения рам крепи в условиях шахты «Щегловская-Глубокая» / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-геологічна. – Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.– Вип. 2(17) С. 16–23.

18. Сахно И.Г. Расчет параметров нового способа перекрепления выработок / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, А.О. Новиков и др. // Записки Горного Института – Санкт-Петербург, 2012. – Том. 199. – С. 185 – 189.

19. Сахно И.Г. Применение невзрывчатых разрушающих составов при проведении выработок вслед за лавой / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Геотехнічна

механіка: Міжвід. зб. наук.праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 99. – С. 110 – 117.

20. Сахно И.Г. Численное моделирование геомеханических процессов с учетом их нелинейности / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2012. – №20-21. – С. 57 – 67.

21. Сахно И.Г. Лабораторные исследования изменения скорости гидратации и фазового состояния саморасширяющихся смесей при воздействии электрического поля / И.Г. Сахно // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2013. – №1. – С. 263 – 269.

22. Сахно И.Г. Направленное разрушение горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Гірничий вісник: Наук.-техн. зб. / ДВНЗ «Криворізький національний університет». – Кривий Ріг, 2013. – Вип. 96. – С. 16 – 20.

23. Сахно И.Г. Повторное использование выработок высоконагруженных лав - крупный резерв снижения производственных затрат / М.П. Зборщик, И.Г. Сахно // Уголь Украины, 2013, – №8 – С. 6–12.

24. Сахно И.Г. Лабораторные исследования динамики роста давления саморасширения невзрывчатой разрушающей смеси в типичных деформационных режимах / И.Г. Сахно, А.В. Молодецкий // Проблеми гірського тиску. – Донецьк, 2013. – №1 (22)-2(23). – С. 3 – 17.

25. Сахно И.Г. Деформирование и разрушение невзрывчатой саморасширяющейся смеси в твердой фазе при объемном нагружении / И.Г. Сахно, А.В. Молодецкий // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк, 2013. – №2. Ч.2 – С. 73 – 80.

26. Сахно И.Г. Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород вокруг выработок, поддерживаемых за лавой / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук.праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – №112 – С. 152 – 162.

27. Сахно И.Г. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния угля в неравнокомпонентном поле напряжений / И.Г. Сахно, А.В. Молодецкий // Физико-технические проблемы горного производства. – 2014. – №17 – С. 68 – 75.

28. Сахно И.Г. Влияние температуры и теплофизических свойств материалов на скорость их разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (8). – С. 86–94 (наукометрична база «Index Copernicus»)

29. Сахно И.Г. Новая невзрывчатая разрушающая смесь для разрушения горных пород в условиях температурных полей подземных горных выработок / И.Г. Сахно, С.В. Борщевский, Я.О. Шуляк // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 1/2012 (72). Ч.1 – С. 116–120 (наукометрична база «Index Copernicus»).

30. Сахно И.Г. Восстановление эксплуатационного состояния горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей / И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2012. – №5. (131). – С. 22–28 (наукометрична база SciVerse Scopus).

31. Сахно И.Г. Опытнo-промышленная проверка способа охраны выработки жесткими сооружениями с компенсационными полостями в условиях шахты „Щегловская-Глубокая“ / Н.Н. Касьян, В.Н. Мокриенко, И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2012. – №6 (132). – С. 30–36 (наукометрична база SciVerse Scopus).

32. Сахно И.Г. Исследование механизма направленного разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2013. – №6 (138). – С. 20-26 (наукометрична база SciVerse Scopus).

33. Сахно И.Г. Изучение динамики развития деформационных процессов и трещинообразования в породном массиве вокруг выработки поддерживаемой за лавой / И.Г. Сахно, Н.Н. Малышева, В.Е. Нефедов // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2014. – №6 (144). – С. 46–51 (наукометрична база SciVerse Scopus).

34. Пат. 98726 Україна, МПК (2012.01) E21 D 9/00, E21C 37/00 Спосіб проведення гірничих виробок / І.Г. Сахно, М.М. Касьян.; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 02300; заявл. 28.02.2011, опубл. 11.06.2012, бюл. № 11. – 5с.:ил.

35. Пат. 99208 Україна, МПК (2012.01) E21 D 11/00 Спосіб ремонту гірничих виробок / І.Г. Сахно, М.М. Касьян.; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а201104658; заявл. 12.09.2011, опубл. 25.07.2012, бюл. № 14. – 5с.:ил.

36. Пат. 100062 Україна, МПК (2006.01) E21C 37/06 Спосіб руйнування гірських порід невибуховими руйнуючимим складами й патрон для його реалізації / І.Г. Сахно, М.М. Касьян.; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 00476; заявл. 17.01.2011, опубл. 12.11.2012, бюл. № 21. – 5с.:ил.

37. Пат. 100270 Україна, МПК(2012.01) E21D 11/00, E21F 15/00 Спосіб охорони підготовчих виробок пройдених по пласту / І.Г. Сахно, М.М. Касьян.; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2010 15564; заявл. 23.12.2010, опубл. 10.12.2012, бюл. № 23. – 4с.:ил.

38. Пат. 102158 Україна, МПК (2013.01) C04B 7/34 (2006.01) B02C 23/06 (2006.01) C09K 3/00, Невибухова руйнуюча суміш / І.Г. Сахно, М.М. Касьян. заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а201114387; заявл. 05.12.2011, опубл. 10.06.2013, бюл. № 11. – 4с.:ил.

39. Сахно И.Г. Лабораторные исследования особенностей повышения несущей способности разрушенных пород путем их распора / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно, В.Д. Иващенко // XIV Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika - Geotechnics 2010. – Gliwice-Ustron, Poland, 19-22 października, 2010. – С. 83 – 92.

40. Сахно І.Г. Опыт разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами / Н.Н. Касьян, О.К. Мороз, И.Г. Сахно // X Szkoła Geomechaniki 2011. – Gliwice-Ustron, Poland, 18-21 października, 2011. – С. 77–87.

41. Сахно І.Г. Управление напряженно-деформированным состоянием горного массива с помощью невзрывчатых разрушающих материалов / Н.Н. Касьян, И.Г. Сахно // Школа подземной разработки: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. – Д: НГУ, 2012. – С. 30 – 38.

42. Сахно І.Г. Исследование особенностей работы невзрывчатых разрушающих смесей в температурных полях характерных для подземных горных выработок / Касьян Н.Н, Мороз О.К, Сахно И.Г. и др. // IXV Jubileuszowe Międzynarodowe Sympozjum Geotechnika-Geotechnics 2012, Materiały Naukowe. Część II: zagraniczna. – Gliwice-Ustron, Poland, 23-26 października, 2012. – С. 51–64.

43. Сахно І.Г. Восстановление сечения и ремонт горных выработок с помощью невзрывчатых разрушающих смесей / Сахно І.Г. // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XII Междунар. конф. (Москва (Россия) – Занджан (Иран), 16-21 сентября 2013г.): Т. 1 / под ред. А.Е. Воробьева, Т.В. Чекушиной. – М.: РУДН, 2013. – С. 150 – 152.

44. Сахно І.Г. Проведение выработок вслед за лавой с помощью невзрывчатых разрушающих составов [Электронный ресурс] / И.Г. Сахно, О.К. Мороз // XI Szkoła Geomechaniki 2013, Gliwice-Ustron, Poland, 15-18 października. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM): цв.; 12 см.

45. СОУ-П 10.1.00174088.031:2011. Контроль за проведением способов и технологических процессов по параметрам акустического сигнала при вскрытии склонных к ГДЯ угольных пластов. – К. Минэнергоуголь Украины, 2011 – 10 с.

Особистий внесок у надруковані у співавторстві наукові праці: [1, 7, 10, 24, 25, 29, 42] – розробка методик та проведення лабораторних досліджень властивостей НРС, обробка та аналіз результатів, розробка напрямів удосконалення НРС; [2, 5, 33, 39] – постановка задачі, проведення лабораторних досліджень деформування масиву представленого суцільним, дискретним і блочно-дискретним середовищами, обробка результатів; [3, 12, 22, 23, 26, 27, 30, 41] – постановка задачі, вибір методу моделювання, проведення чисельного математичного моделювання зміни НДС породного масиву під впливом геомеханічних, технологічних процесів і при впливі НРС, обробка результатів; [8, 11, 15, 17, 31, 40] – участь у шахтних натурних спостереженнях і впровадження результатів досліджень, проведення аналізу; [9, 19, 34-38, 44, 45] – розробка способів руйнування гірських порід і управління їх НДС, розробка методик розрахунку їх параметрів.

АНОТАЦІЯ

Сахно І.Г. Наукові основи управління станом гірських порід невибуховими руйнуючими сумішами при підземній розробці родовищ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» МОН України, Дніпропетровськ, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної нової наукової проблеми управління станом гірських порід невибуховими руйнуючими сумішами при підземній розробці родовищ. На підставі теоретичних, лабораторних і промислово-експериментальних досліджень встановлені закономірності формування НДС масиву при застосуванні невибухових руйнуючих сумішей для управління станом гірських порід з урахуванням кінетики їх гідратації в шпурових і свердловинних зарядах в часі, конструкції зарядів, впливу технологічних фізичних процесів.

В результаті проведених досліджень вперше встановлені закономірності формування перехідних процесів в НРС в часі залежно від характеристик системи «НРС-масив». Виявлено особливості розвитку тріщин навколо шпуру з НРС та розроблено модель руйнування з урахуванням існуючого поля напружень. Досліджено механізм спрямованого руйнування гірських порід НРС. Встановлено закономірності формування критичних напружень в основній покрівлі при зміні довжини породної консолі у виробленому просторі і жорсткості охоронного споруди.

Розроблено методику визначення параметрів руйнування гірських порід в підземних гірничих виробках за допомогою невибухових руйнуючих сумішей. Розроблені та затверджені нормативні документи. Сумарний річний ефект від впровадження рекомендацій склав 1,46 млн грн.

Ключові слова: управління станом гірських порід, невибухова руйнуюча суміш, руйнування гірських порід, напружено-деформований стан, напруження, стійкість виробок.

АННОТАЦИЯ

Сахно И.Г. Научные основы управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.02 – «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых». – Государственное ВУЗ «Национальный горный университет» МОН Украины, Днепропетровск, 2015.

Повышение эффективности подземной разработки месторождений сопряжено с совершенствованием разрушения горных пород во время различных технологических операций и управлением состоянием горных пород. Одним из наиболее перспективных средств воздействия на горный массив и крепижные системы являются невзрывчатые разрушающие смеси. Их применение дает возможность совершенствования параметров устойчивости горных выработок на разных этапах поддержания и восстановления их

эксплуатационного состояния в сложных горно-геологических условиях разработки месторождений.

Диссертация посвящена установлению зависимостей формирования НДС при применении невзрывчатых разрушающих смесей для управления состоянием горных пород при подземной разработке месторождений. Это является актуальной новой научной проблемой при управлении состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями.

На основании теоретических, экспериментальных и промышленно-экспериментальных исследований впервые установлены закономерности формирования переходных процессов в НРС во времени в зависимости от жесткости системы «НРС-массив», температуры окружающей среды, предварительного сжатия, воздействия электрического поля, введения этановой кислоты и гумата натрия, что позволяет регулировать скорость гидратации и давление расширения НРС при решении задач разрушения горных пород и управления их НДС. Выявлены особенности развития трещин вокруг шпура с НРС и разработана модель разрушения с учетом существующего поля напряжений. Исследован механизм направленного разрушения горных пород НРС. Установлены закономерности формирования критических напряжений в основной кровле при изменении длины породной консоли в выработанном пространстве и жесткости охранного сооружения, что характеризует качественные изменения механизма нагрузки охранной системы и определяет приоритетные направления управления НДС массива. Показано, что минимизация энергозатрат на принудительное обрушение консоли основной кровли может быть достигнута за счет изменения НДС и создания условий для разрушения пород в зоне естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси зависающего слоя пород основной кровли с помощью НРС, помещенных в скважины.

Разработана методика определения параметров разрушения горных пород в подземных горных выработках с помощью невзрывчатых разрушающих смесей. Разработаны и испытаны модифицированные НРС с добавлением этановой кислоты и гумата натрия. Разработаны способы управления НДС горных пород, основанные на эффекте статического воздействия НРС во времени на горный массив и крепежные системы горных выработок. Разработаны и утверждены «Рекомендации по применению невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок угольных шахт Донбасса», СОУ-П 10.1.00174088.031: 2011, СТП (02070826) (33161769): 2014. Результаты работы позволяют повысить эффективность управления состоянием горных пород при подземной разработке месторождений.

Разработанные рекомендации по разрушению горных пород и управлению их НДС нашли применение на шахтах Министерства энергетики и угольной промышленности Украины. Суммарный годовой эффект от внедрения рекомендаций в ПАО Ш/У «Покровское» составил 1,46 млн грн, что подтверждает целесообразность предложенных технико-технологических мероприятий.

Ключевые слова: управление состоянием горных пород, невзрывчатая разрушающая смесь, разрушение горных пород, напряженно-деформированное состояние, напряжения, устойчивость выработок.

ABSTRACT

Sakhno I.H. Scientific bases of mine rock state control by non-explosive destructive mixtures in underground mining. – Manuscript.

Thesis for the competition for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.15.02. – Underground mining of mineral deposits. – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2015.

The dissertation is dedicated to the solution of an urgent scientific problem of mine rock control by non-explosive destructive mixtures (NDM) in underground mining. On the basis of theoretical, laboratory, industrial and experimental research regularity of a strain-stress state through the use of non-explosive destructive mixtures for mine rock state control is determined with due regard for the kinetics of their hydration in blast-hole and borehole charges in time spans, the charge construction, the impact of technological physical processes.

As the result of the carried out investigation the regularity of transient processes formation in non-explosive destructive mixtures in time spans are first determined depending on the “NDM – massif” system properties. Special features of cracking around the borehole by NDM are revealed and a destruction model is developed with regard for the existing strain field. The mechanism of mine rock directed destruction by NDM is considered. The regularity of critical stress formation in the main roof is determined depending on the change in the rock cantilever length in the open goaf and on the protective construction rigidity.

The methods of determining the parameters of mine rock destruction in underground workings by means of NDM are worked out. Specification documents are worked out and approved. The total annual effect due to the implementation of the recommendations made 1.46 mln UAH.

Keywords: the rock state control, non-explosive destructive mixtures, mine rock destruction, stress-strain state, stresses, the rigidity of workings.

Сахно Іван Георгійович

**НАУКОВІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ СТАНОМ ГІРСЬКИХ ПОРІД
НЕВИБУХОВИМИ РУЙНУЮЧИМИ СУМІШАМИ ПРИ ПІДЗЕМНІЙ
РОЗРОБЦІ РОДОВИЩ**

(Автореферат)

Підписано до друку 19.08.2015. Формат 60x84 1/32

Папір типограф. Гарнітура Times New Roman

Друк лазерний. Умов. друк. арк. 1,9.

Тираж 100 прим. Замов. № 47/15

**Надруковано у Видавничому центрі КП ДВНЗ «ДонНТУ»
85300, Україна, Донецька обл., м. Красноармійськ, пл. Шибанкова 2
тел.: (06239) 2-03-09**